



Universidade de Aveiro
2010

Departamento de Física

**Carina Alexandra Carvalho
Soares**

**Validação de Estimativas do
Recurso Eólico Obtidas com o
Modelo Numérico WRF**



Universidade de Aveiro
2010

Departamento de Física

Carina Alexandra Carvalho Soares **Validação de estimativas do
recurso eólico obtidas com o
modelo numérico WRF**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria De Los Dolores Josefa Manso Orgaz, Professora Associada do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

o júri
presidente

Doutor Paulo Manuel Cruz Alves Silva
Professor auxiliar da Universidade de
Aveiro

Doutora Maria de los Dolores Josefa
Manso Orgaz
Professora Associada da Universidade
de Aveiro

Engenheiro Ricardo André Martins
Ferreira Guedes - MEGAJOULE

Doutora Liliana do Carmo Santiago
Caramelo
Professora Auxiliar da Universidade de
Trás-os-Montes e alto Douro

Agradecimentos

Começando pelo mais importante, gostaria de agradecer à minha família pelo apoio incondicional e constantes palavras incentivo ao longo de todo o percurso académico.

Agradeço à minha orientadora na Universidade de Aveiro Doutora Maria De Los Dolores Josefa Manso Orgaz pela orientação e supervisão durante a elaboração desta dissertação.

Ao meu orientador de estágio, Engenheiro Ricardo André Martins Ferreira Guedes agradeço a supervisão e principalmente por todos os conhecimentos transmitidos ao longo deste último ano.

Ao meu colega de trabalho Guilherme Chagas uma vez que algumas das simulações utilizadas neste trabalho são anteriores à minha colaboração com a MEGAJOULE e portanto foram precedidas por ele.

Aos meus colegas de trabalho agradeço a disponibilidade, o auxílio, a simpatia e o bom humor.

Aos meus amigos agradeço o apoio de todos os dias.

Palavras-chave

Validação, modelo WRF, simulação do vento, energia eólica.

Resumo

O presente trabalho propõe avaliar a qualidade das previsões dos dados de vento produzidos pelo modelo de previsão numérica WRF-ARW, em foco na avaliação do recurso eólico para aproveitamento energético.

Os locais seleccionados para análise possuem características climáticas distintas, sendo estes localizados em Portugal, Polónia, Roménia e Cabo Verde. Foram efectuadas uma ou mais simulações para os locais em questão de forma a obter períodos de 6 ou 12 meses de dados simultâneos com estações anemométricas a operar nos domínios em questão.

Tendo em conta que o objectivo era averiguar a qualidade das simulações para a avaliação do recurso eólico, este estudo baseia-se nas componentes horizontais do vento. A validação do vento previsto pelo WRF para avaliação de locais de futuros parques eólicos foi efectuada tomando em consideração parâmetros estatísticos como o erro médio quadrático (RMSE), erro sistemático (BIAS), o desvio padrão (STDE), o coeficiente de correlação (R^2 , a, b), e a semelhança entre as rosas-dos-ventos, rosas-dos-ventos de produção de energia e histograma da intensidade do vento.

Os resultados foram satisfatórios para o tipo de avaliação pretendida, constatando que as fontes de desvios podem provir maioritariamente dos ficheiros de dados meteorológicos utilizados como condições iniciais (Reanalysis 1 NCEP/NCAR) e dos dados de cobertura do solo (GTOPO 30) integrados pelo modelo.

Keywords

Validation, WRF model, wind simulation, wind energy.

Abstract

The propose of this work is to evaluate the quality of wind data produced by the numeric forecasting model WRF-ARW.

The chosen sites for this analyses show distinct climatic characteristics are located in Portugal, Poland, Romania and Cape Verde.

One or more simulations for the above mentioned locations have been conducted to obtain results for periods of 6 or 12 months concurrent with the observations.

The objective was to verify the quality of simulations for wind assessment the analyses was based on the horizontal component of the wind vector. The validation of the modeled wind took into account statistic measures like the RMSE, the systematic error BIAS, the standard deviation, the coefficient of correlation R^2 , a, b, the comparison of wind roses, wind roses of energy production and wind speed histogram.

The results of this work are satisfying for the type of analyze which was pretended. The deviation sources can be mainly provided from initial conditions (Reanalysis 1 NCEP/NCAR) and soil cover (GTOPO30) integrated by numerical model.

Índice

1	<i>Introdução</i>	10
2	<i>Estado da arte</i>	3
2.1	Análise de aplicações simulares na estimativa do recurso eólico	3
3	<i>Metodologia e dados</i>	5
3.1	Modelo Numérico WRF-ARW	5
3.1.1	Descrição do modelo de mesoescala WRF	5
3.1.2	Dados de inicialização e Condições fronteira	6
3.1.3	Configuração da simulação numérica.....	8
3.2	Análise Climática	12
3.2.1	Controlos Climáticos Semi-Permanentes	13
3.2.2	Distúrbios Sinóticos	16
3.2.3	Efeitos locais e de Mesoescala	17
3.3	Dados Reais.....	19
3.3.1	Método de aquisição de dados	19
3.3.2	Análise de dados.....	19
3.3.3	Análise dos regimes de vento no contexto do aproveitamento energético do recurso eólico	20
3.4	Metodologia de Validação	23
4	<i>Resultados e Discussão</i>	26
4.1	Portugal	26
4.1.1	Simulação 1.....	26
4.1.2	Simulação 2.....	28
4.2	Polónia.....	31
4.3	Roménia.....	33
4.4	Cabo Verde	37
4.5	Global.....	40
5	<i>Conclusões</i>	41
6	<i>Bibliografia</i>	44

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Mapa de vento, a 60 metros acima d nível do solo, produzido com recurso a dados de Mesoescala produzidos pelo WRF.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2 - Os esquemas a) e b) são referentes às malhas de calculo horizontal e vertical segundo o esquema de Arakawa C. O esquema c) mostra a discretização dos níveis eta sobre a topografia.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3 - Velocidade média do vento à superfície, proveniente do projecto Reanalysis com os limites administrativos das áreas em estudo. A velocidade média foi calculada com base no período climatológico, 30 anos, decorrente de Janeiro de 1978 a Dezembro de 2007.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4 - Posicionamento dos domínios de simulações para Portugal Continental. Grelha exterior a pontado verde (27 km), grelha intermédia a pontado amarelo (9km), grelha interna a pontado vermelho (3km), sobre o mapa de Portugal.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5 - Posicionamento dos domínios de simulação para a Polónia e Roménia. Grelha exterior a pontado verde (27 km), grelha intermédia a pontado amarelo (9km), grelha interna a pontado vermelho (3km), sobre os mapas da Polónia e Roménia.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 6 - Posicionamento dos domínios das simulações para Cabo Verde. Grelha exterior a pontado amarelo (9km), grelha interna a pontado vermelho (3km), sobre o mapa de Cabo Verde. 10</i>	
<i>Figura 7 - Esquema representativo de mastro anemométrico instrumentado a várias alturas.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8 - Registos de velocidade de uma campanha de medição a 61 acima do nível do solo.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9 - Histograma de velocidades e distribuição de Weibull.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10 - Função de distribuição de densidade de Weibull para k=2 e A variável.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11 - Função de distribuição de densidade de Weibull para A=1 e k variável.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12 - Rosa-dos-ventos (esquerda) e velocidade média por sector (direita).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13 - Rosa-dos-ventos energética.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 14 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local P1.6 e P1.5. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza correspondem às direcções simuladas. Simulação 1, Portugal.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local P2.5 e P2.3. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza correspondem às direcções simuladas. Simulação 2, Portugal.</i>	<i>30</i>

<i>Figura 16 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local PL5 e PL4. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza correspondem às direcções simuladas. Simulação Polónia.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local RO14 e RO6. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza corresponde às direcções simuladas. Simulação Roménia.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 18 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local CV1 e CV4. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza corresponde às direcções simuladas, para Cabo Verde.</i>	<i>39</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Configuração das simulações numéricas</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2 - Parametrizações utilizadas nas simulações WRF.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 3 - Velocidade média semestral observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas. 26</i>	
<i>Tabela 4 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 5 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 6 - Velocidade média semestral observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas. 29</i>	
<i>Tabela 7 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 8 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 9 - Velocidade média anual observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas. 31</i>	
<i>Tabela 10 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 11 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 12 - Velocidade média anual observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas. 34</i>	
<i>Tabela 13 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 14 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 15 - Velocidade média anual observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas. 37</i>	

<i>Tabela 16 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 17 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 18 - Grandezas estatísticas por zona geográfica.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 19 - Grandezas estatísticas calculadas com base em todas as estações.</i>	<i>40</i>

1 Introdução

Uma ampla compreensão dos padrões de vento é crucial para o sucesso no desenvolvimento de novos parques eólicos. Com a finalidade de se obter os dados necessários, são efectuados vários estudos incluindo, principalmente, medições locais, simulações em Microescala e análises climáticas em grande escala. No entanto, os estudos tradicionais em grande escala negligenciam frequentemente os fenómenos locais, uma vez que são baseados numa análise ampla que não considera o efeito das características locais do relevo, ocupação do solo, etc., criando uma considerável discrepância entre padrões climáticos e medições locais.

A abordagem ideal para preencher essas lacunas é ter acesso a várias medições locais por longos períodos de tempo. Contudo, essa abordagem raramente está disponível para os promotores no início dos estudos e prospecções primárias.

Nestes casos, o uso da modelação computacional de Mesoescala para a caracterização do padrão de ventos pode ser de grande valia. Com a utilização de dados climáticos públicos, a modelação permite estimar a distribuição do potencial eólico em grandes áreas com uma considerável resolução. Se os erros e limitações forem correctamente considerados, os resultados podem ser utilizados para apoiar eficazmente uma classificação inicial e selecção dos locais para projectos de parques eólicos (Figura 1).

Para cada uso específico do modelo os resultados devem, idealmente, ser validados especificamente. Idealmente esta validação deverá passar pelo recurso a observações locais das características do vento (ou outros parâmetros climáticos) com os quais os resultados da modelação numérica possam ser comparados, bem como pela interpretação dos fluxos climáticos simulados tendo em consideração o conhecimento genérico do clima regional e de larga escala. No âmbito de proceder a uma validação o mais completa possível foram escolhidos locais com climatologias bastante distintas, como Portugal, Polónia e Roménia, e Cabo Verde.

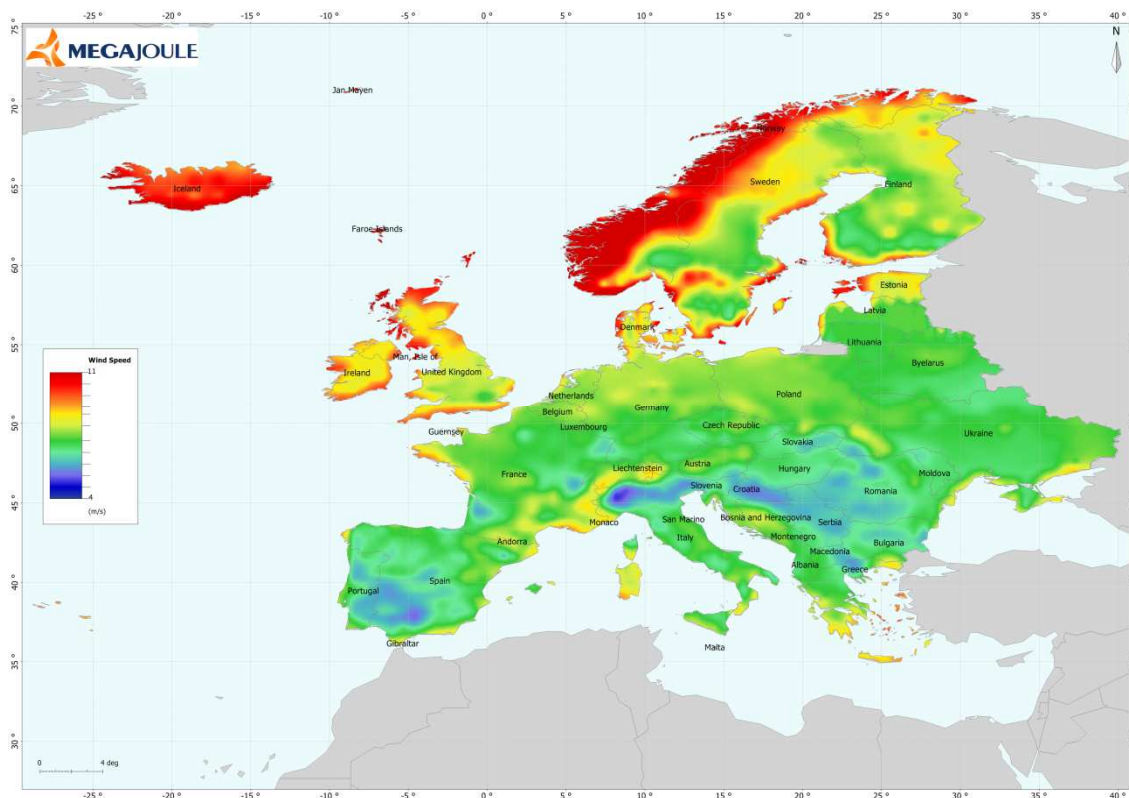


Figura 1 - Mapa de vento, a 60 metros acima d nível do solo, produzido com recurso a dados de Mesoescala produzidos pelo WRF.

O presente trabalho encontra-se organizado por capítulos, sendo este o primeiro de cinco. O segundo capítulo trata o estado da arte da modelação numérica de vento através de modelos de Mesoescala, apresentando um breve resumo de alguns estudos relacionados com validação do modelo de previsão numérica WRF com dados de vento. O capítulo seguinte é de índole teórica e encontra-se dividido em quatro subcapítulos. O primeiro subcapítulo apresenta uma breve descrição do modelo numérico WRF-ARW utilizado neste trabalho, assim como dos dados de entrada utilizados nas simulações; no segundo subcapítulo encontra-se justificada a escolha dos locais utilizados neste estudo e é resumidamente descrita a climatologia associada a cada local; no terceiro subcapítulo é descrita a forma de aquisição de dados e o método de análise dos mesmos e no quarto subcapítulo é feita uma breve abordagem aos métodos utilizados no processo de validação. No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos e os respectivos comentários, dos quais serão retiradas elações para as conclusões finais que se encontram no quinto capítulo.

2 Estado da arte

Devido ao impacto que o estado do tempo tem no quotidiano do ser humano modelos de previsão do tempo em Mesoescala antigos como o MM5 têm vindo a ser melhorados pela comunidade científica, e a dar origem a outros modelos de previsão numérica como o ARW (Advanced Research WRF) do WRF (Weather Research and Forecasting System). O modelo de previsão do tempo WRF foi utilizado operacionalmente pela primeira vez em Abril de 2005 sobre a América do Norte e posteriormente para domínios na Europa e Atlântico Norte [12]. Ao longo dos últimos anos foram lançadas novas versões do modelo, tal revela o constante investimento da comunidade científica em aperfeiçoar cada vez este modelo de forma a melhorar cada vez melhor os fenómenos atmosféricos. O facto de os dados utilizados como condições fronteiras nos modelos de Mesoescala se encontrarem disponíveis quase em tempo real para todo o globo e serem públicos nos dias de hoje também facilita o uso cada vez mais comum deste tipo de modelos.

A actividade modelação em Mesoescala na MEGAJOULE teve início no ano de 2007, tendo sido uma actividade com crescente interesse desde então. O modelo considerado é o WRF, para o qual as configurações foram estudadas previamente. O modelo é executado num cluster computacional de 16 núcleos de processamento (cores). O recurso à modelação de Mesoescala é essencialmente considerado para avaliações preliminares de locais através de mapeamentos das condições médias do vento, extracção de séries de dados simuladas para condução de estudos de microescala em modelos apropriados e análise da variabilidade climática através da geração de séries de dados de longo prazo. A aplicação deste tipo de estudo tem sido global, com foco especial em Portugal, Polónia, Roménia e Brasil.

2.1 Análise de aplicações similares na estimativa do recurso eólico

Na compilação de material para esta análise foram levados em conta apenas artigos com o modelo WRF ou MM5 por questões de coerência com o objectivo e metodologia aplicada na MEGAJOULE.

[17] *Atlas éolien de la Bretagne*. Para avaliar o mapa de ventos simulado para a região da Bretanha foram utilizados dados provenientes de 20 mastros anemométricos às alturas de 30 e 40 metros acima do nível do solo e 22 estações meteorológicas, o que não seria o ideal para avaliar os mapas de vento a 60 e 80

metros. O período de referência utilizado decorreu de 1991 a 2001. As comparações efectuadas baseiam-se apenas no desvio da velocidade do vento expresso em percentagem. Os resultados obtidos revelam erros no intervalo de -8% a 30% para os dados provenientes de mastros anemométricos e no intervalo de -23% a 41%.

[7] *Comparison of WAsP, CFD, NWP and Analytical Methods for Estimating Site Wide Wind Speeds*. Este trabalho compara diferentes métodos de avaliação do recurso eólico, no entanto vou apenas revelar os dados referentes aos dados obtidos a partir do modelo de previsão numérica WRF. Os dados utilizados nessa avaliação são provenientes de torres meteorológicas a operar na América do Norte e encontram-se em tipos de terreno distintos. Os resultados do modelo foram comparados com os dados reais, apenas em dois locais, tendo em conta a medida de erro RMSE (root-mean-square-error). Foi obtido um RMSE de 5.8% e 7.2%. Os resultados foram inconclusivos uma vez que os locais tinham fraca variabilidade na velocidade do vento.

[24] *The FirstLook Global Wind Dataset: Annual Mean Validation*. Este trabalho tinha como objectivo validar o mapa de ventos produzido para todo o globo com a resolução horizontal de 2 arco-segundos. A validação do mapa foi efectuada com recurso a mais de 4000 estações meteorológicas a 10 metros do solo do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) espalhadas por todo o globo. Foram utilizadas 2420 estações para avaliar o recurso na América do Norte, 304 para a América do Sul, 229 para África, 871 para a Europa, 289 para a Ásia e 42 para a Austrália, o que dá um total de 4155 estações na avaliação do mapa de vento global. O Bias varia entre -0.19 m/s e os +0.65m/s e o RMSE entre 0.77 m/s e 1.15 m/s. Este trabalho levou à conclusão que o mapa de vento produzido pela 3TIER para todo o globo está bem representado para terreno simples. As discrepâncias são maiores quanto maior é a complexidade do terreno e quanto mais próximo à costa.

3 Metodologia e dados

3.1 Modelo Numérico WRF-ARW

3.1.1 Descrição do modelo de mesoescala WRF

A simulação do clima de ventos regional é realizada pelo modelo numérico de previsão de tempo Weather Research and Forecasting System (WRF, UCAR). Este modelo de Mesoescala é actualmente utilizado por inúmeras instituições por todo o mundo, e a sua versatilidade garante uma personalização completa para uma vasta gama de estudos. Este sistema de modelação numérica consiste em vários módulos especialmente criados para assimilar dados de observações e simular condições atmosféricas, resolvendo várias equações que descrevem a dinâmica e termodinâmica dos escoamentos atmosféricos em áreas limitadas [15]; [21].

O domínio de simulação é caracterizado por uma malha regular (resolução horizontal com $\Delta x = \Delta y$), onde o posicionamento da simulação pode ser determinado em relação ao centro geométrico, este será definido pelas coordenadas de latitude e longitude. As coordenadas indicadas irão corresponder ao centro do domínio principal, sendo os domínios seguintes posicionados em relação ao canto inferior esquerdo do domínio que o antecede.

A dimensão do domínio é determinada pelo número de nós de cada domínio e a sua discretização espacial é efectuada com recurso a malhas desfasadas no espaço pelo esquema Arakawa C. As variáveis de massa são definidas no centro da malha, no entanto as componentes do vento são definidas nos limites da malha, Figura 2 a) e b), sendo posteriormente interpoladas para o cálculo da velocidade do vento.

O modelo WRF utiliza como coordenadas verticais as coordenadas eta, η . As coordenadas η permitem que a camada inferior da atmosfera do modelo seja representada, para cada ponto da malha, por um degrau horizontal. Estas coordenadas são definidas pela expressão: $\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{(p_{hs} - p_{ht})}$, onde p_h é a componente hidrostática da pressão, p_{hs} refere-se a valores ao longo da superfície e p_{ht} a valores no topo da atmosfera do modelo, Figura 2 c) [22].

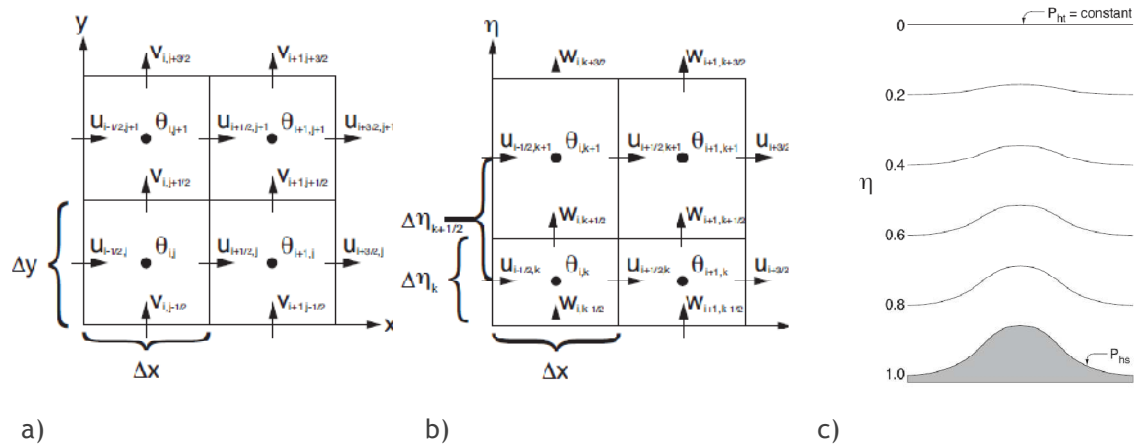


Figura 2 - Os esquemas a) e b) são referentes às malhas de cálculo horizontal e vertical segundo o esquema de Arakawa C. O esquema c) mostra a discretização dos níveis η sobre a topografia.

O modelo dispõe de um conjunto de parametrizações físicas que permitem o cálculo explícito de fenómenos físicos inferiores à malha utilizada ou que possuem solução numérica complexa. As diferentes parametrizações calculam as tendências para os campos das componentes da velocidade, temperatura potencial e humidade.

O WRF é um modelo transiente não-linear, e como qualquer modelo numérico depende das condições de fronteira para caracterizar as condições iniciais do sistema e manter a estabilidade numérica durante a simulação. A fim de se descrever um sistema atmosférico complexo, é necessário possuir dados precisos para representar o estado inicial da atmosfera e as suas fronteiras físicas, tais como a rugosidade, a topografia e a cobertura do terreno.

3.1.2 Dados de inicialização e Condições fronteira

As simulações climáticas regionais necessitam de uma extensa quantidade de dados, abrangendo pelos menos 30 anos, e um código computacional capaz de descrever em pormenor os efeitos das características locais. A fim de se obter condições de larga escala são utilizados dados do projecto Reanalysis NCEP/NCAR. Este projecto, concebido pelo National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e pelo National Center for Environment Prediction (NCEP), consiste numa base de dados de observações globais a partir de várias fontes (observações meteorológicas tradicionais, bóias, satélites e outros) reconstruídas usando avançadas técnicas de modelação e controlo de qualidade [13]. Estes dados descrevem a atmosfera em vários níveis verticais, com uma resolução horizontal de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (aproximadamente 208 km x 208 km), sendo utilizados em estudos de

larga escala e para inicialização de simulações de menor escala. Estes dados são comumente usados na modelação de Mesoescala de recursos eólicos e na condução de projectos de pesquisa climática. As condições atmosféricas nesta base de dados são limitadas pela resolução horizontal onde cada célula representa um ambiente é homogéneo (Figura 3).

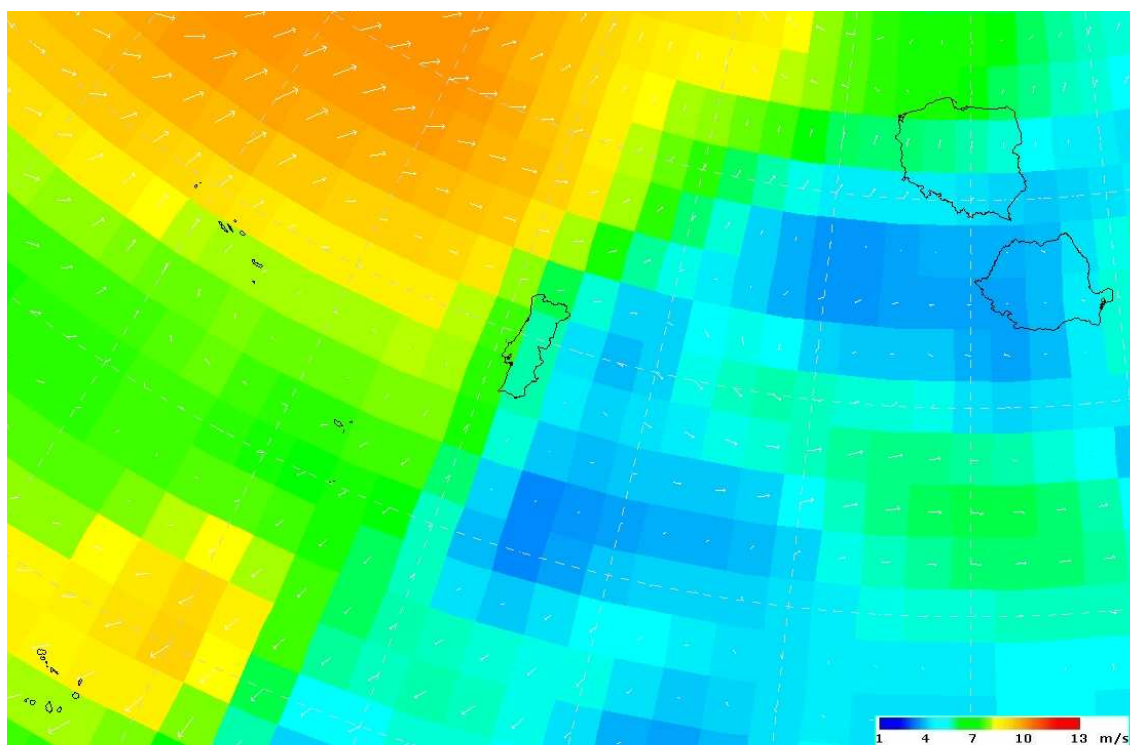


Figura 3 - Velocidade média do vento à superfície, proveniente do projecto Reanalysis com os limites administrativos das áreas em estudo. A velocidade média foi calculada com base no período climatológico, 30 anos, decorrente de Janeiro de 1978 a Dezembro de 2007.

As condições de larga escala dos dados de Reanalysis são utilizadas num método de downscaling dinâmico, a fim de fornecer os dados transientes de inicialização. Este método consiste na inicialização de um modelo de área limitada (LAM – limited area model), como o WRF, utilizando dados de massa, momento e termodinâmica oriundos de um modelo de circulação geral (GCM – general circulation model) ou outro LAM com área superior, e provendo condições de contorno laterais durante a integração numérica do modelo. Esta técnica possui a vantagem de refinar a simulação de condições regionais devido ao aumento na resolução horizontal (e consequente melhoria na caracterização da fronteira inferior), e por permitir a simulação (ao invés de parametrização) de certos fenómenos dinâmicos que ocorrem na Mesoescala, como a convecção profunda [5].

Os dados das fronteiras físicas são oriundos do USGS 30-second Global Elevation Data (United States Geological Survey and University Corporation for Atmospheric

Research). Esta base de dados consiste num modelo de elevação digital (DEM – Digital Elevation Model) que fornece informação sobre a elevação do terreno num domínio horizontal de 30 arco segundos (aproximadamente 1 km), derivada de diversas fontes vectoriais e raster de informações topográficas [25].

Os dados de cobertura do solo são provenientes do Global Land Cover Characteristics Data Base (USGS, National Center for Earth Resources Observation and Science – EROS, Joint Research Centre of the European Commission). Os dados consistem numa série de informações globais sobre as características de cobertura do solo com resolução horizontal de 1 km, concebidos para utilização numa ampla gama de aplicações de investigação ambiental e modelação, adquiridos de observações globais realizadas entre Abril de 1992 e Março de 1993 do Advanced High Resolution Radiometer, a bordo dos satélites da série NOAA [16]; [18]; [19].

Dados de Temperatura da Superfície do Mar (SST – Sea Surface Temperature) são extraídos do Daily Real-Time, Global Sea Surface Temperature Analysis (RTG-SST), disponibilizado pelo National Centers for Environment Prediction (NCEP), National Weather Service (NWS/NOAA). Esta base de dados consiste numa combinação diária de dados in-situ e medições do Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR, v4.1) SST analysis, numa grelha de 0.5 graus de resolução, fornecendo ao modelo numérico as informações necessárias para representar a formação de brisas mar-terra [3] e [19].

3.1.3 Configuração da simulação numérica - Domínio físico

A simulação numérica consiste na assimilação de dados e a realização de centenas de cálculos em diversos passos temporais para estabelecer as condições atmosféricas durante um ano inteiro.

Com a finalidade de melhor assimilar as condições de larga escala, foram empregues três domínios na simulação numérica, num esquema aninhado de duas vias. Este esquema consiste num posicionamento telescópico dos domínios de simulação, onde o domínio mais externo cobre uma região maior, consequentemente utilizando uma gama maior dos dados de entrada como condição inicial, e o domínio interno cobre principalmente a área desejada, estando inteiramente contida no domínio externo (Figuras 4, 5 e 6). O posicionamento dos domínios leva em consideração as principais características locais (como montanhas e vales) que estejam próximos das extremidades, sendo propriamente posicionada a fim de abranger tais características na simulação, consequentemente permitindo

uma caracterização mais apropriada do fluxo considerando tais ocorrências. Por ser um esquema de duas vias, as condições simuladas no domínio interior actualizam os valores nos domínios exteriores quando os mesmos estão sobrepostos; portanto fenómenos de escalas inferiores confinados ao domínio interno poderão propagar para os domínios externos.

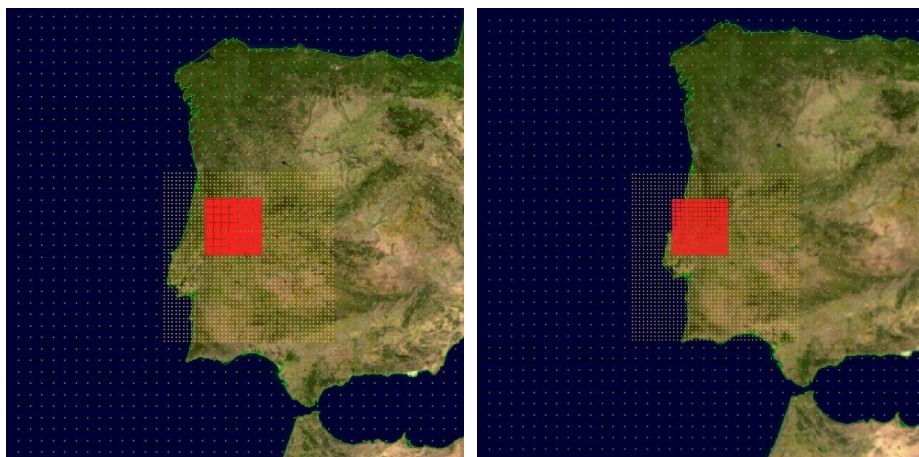


Figura 4 - Posicionamento dos domínios de simulações para Portugal Continental. Grelha exterior a ponteadado verde (27 km), grelha intermédia a ponteadado amarelo (9km), grelha interna a ponteadado vermelho (3km), sobre o mapa de Portugal.

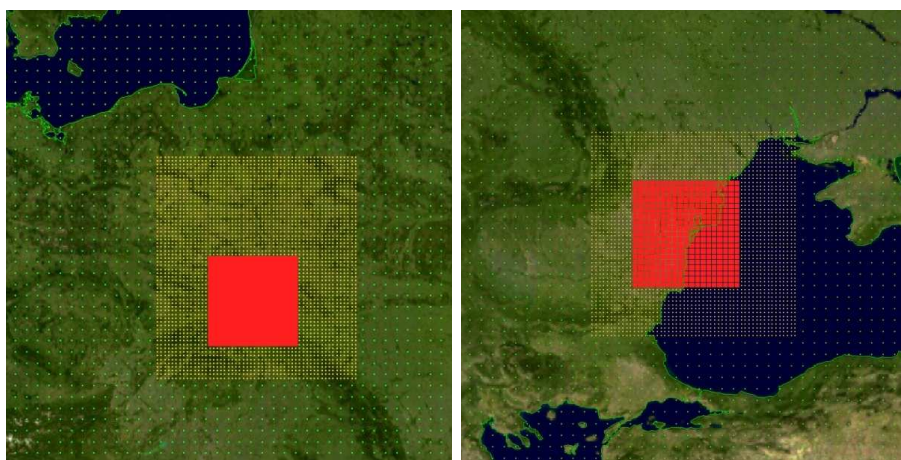


Figura 5 - Posicionamento dos domínios de simulação para a Polónia e Roménia. Grelha exterior a ponteadado verde (27 km), grelha intermédia a ponteadado amarelo (9km), grelha interna a ponteadado vermelho (3km), sobre os mapas da Polónia e Roménia.

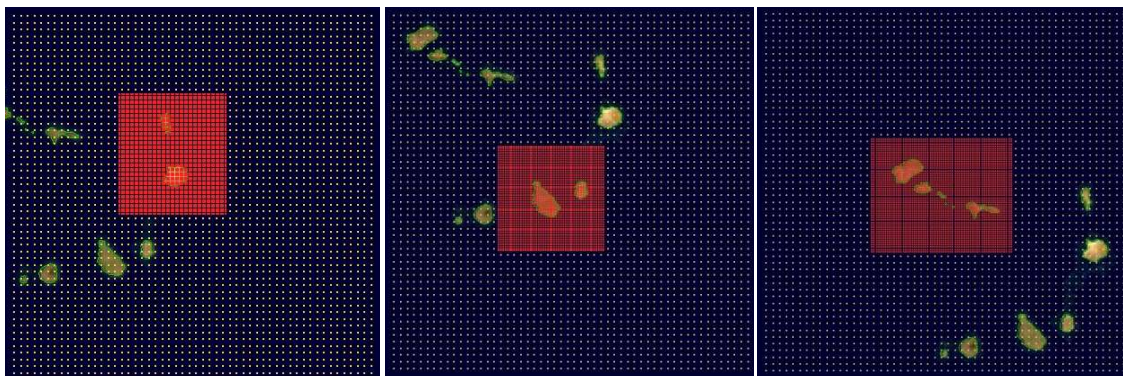


Figura 6 - Posicionamento dos domínios das simulações para Cabo Verde. Grelha exterior a ponteadado amarelo (9km), grelha interna a ponteadado vermelho (3km), sobre o mapa de Cabo Verde.

Devido à localização das regiões em estudo e ao regime climático do vento conhecido para cada uma destas, torna-se de interesse representar os efeitos de formação de brisas na simulação numérica. As brisas têm origem quando o gradiente térmico entre duas regiões distintas é elevado, podendo ser originado tanto em terra quanto em corpos de água. A fim de representar a variabilidade térmica de oceanos, tornou-se necessário utilizar uma base de dados adicional na discretização das condições iniciais do modelo, por meio de assimilação de dados de temperatura da superfície do mar (SST – Sea Surface Temperature).

A razão da resolução espacial e temporal entre os domínios é de 1/3, consequentemente os domínios de maior resolução espacial (horizontal) são o intermédio com 9 km, e o interno com 3km de resolução (Tabela 1), com 42 níveis verticais estáticos. Por ser um modelo transiente não-linear, as condições atmosféricas são calculadas em diversos passos temporais e, de forma a manter a estabilidade numérica (de acordo com a condição de Courant-Fiedrichs-Lewy [6] e características da fronteira inferior), um passo de tempo principal de 50s foi aplicado durante toda a simulação; um passo temporal secundário foi utilizado para domínios internos, de acordo com a razão 1/3.

Tabela 1 - Configuração das simulações numéricas

Simulação	Parâmetro	Domínio Intermédio 9x9km	Domínio Interno 3x3km
Portugal (PT1)	Centro	39.2763; -7.25818	39.9254; -7.67941
	Número de pontos	46X46	46x46
Portugal (PT2)	Centro	38.8757; -8.0510	39.5248; -8.46982
	Número de pontos	46X46	46x46
Polónia (PL)	Centro	50.9477; 21.2123	50.2307; 21.1688
	Número de pontos	55x61	73x73
Roménia (RO)	Centro	44.6617; 28.927	44.6348; 28.6622
	Número de pontos	55x55	85x85
Cabo Verde (CV1)	Centro	19.9205; -22.5579	16.3786; -22.8385
	Número de pontos	55x55	49x55
Cabo Verde (CV2)	Centro	15.2405; -23.2405	15.1325; -23.5377
	Número de pontos	55x55	49x49
Cabo Verde (CV3)	Centro	16.8405; -24.6577	16.7595; -24.7423
	Número de pontos	55x55	64x52

3.1.4 Configuração da simulação numérica - Esquemas Físicos

Os esquemas físicos são implementados em diferentes módulos e classificados consoante a sua função ([8], [9] e [10]). Os esquemas de radiação de curto comprimento de onda (RCO) resolvem as trocas radiativas de curto comprimento de onda, nomeadamente a visível e ultravioleta, enquanto os esquemas de radiação de longo comprimento de onda (RLO) resolvem na banda do infravermelho. Os processos de condensação e evaporação no ar são resolvidos pelos esquemas de microfísica (MF), o atrito e os fluxos de calor, de quantidade de movimento e de vapor de água na camada de atrito junto ao solo são resolvidos pelos esquemas da camada de superfície (CS), já os esquemas da camada limite planetária (CLP) resolvem as trocas turbulentas na camada limite planetária mas também ao longo de toda a coluna vertical e as trocas de água e calor no interior do solo correspondem ao bloco do modelo de superfície do solo (MSS). As parametrizações

de cumulus (PC) resolvem a formação de nuvens de origem convectiva. Os esquemas de parametrizações utilizadas encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 - Parametrizações utilizadas nas simulações WRF

Parametrizações	
Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO)	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Longwave - rtm scheme
Radiação Curto Comprimento de Onda (RCO)	MM5 (Dudhia) Shortwave - Dudhia scheme
Microfísica (MF)	Eta Grid-scale Cloud and Precipitation (2001) scheme - Ferrier (new Eta) microphysics
Parametrização de Cumulus (PC)	Kain-Fritsch - Kain-Fritsch (new Eta) scheme
Camada de Superfície (CS)	Similarity theory (MM5) - Monin-Obukhov scheme
Modelo de Superfície do solo (MSS)	sf_surface_physics = 2, 2 ;Noah land-surface model - Noah Land Surface model compatible option
Camada Limite Planetária (CLP)	Yonsei University (YSU) PBL - YSU scheme

3.2 Análise Climática

O clima regional de uma região específica é afectado por uma série de ocorrências meteorológicas com distintas escalas temporais e espaciais. Com o objectivo de melhor analisar o clima em larga escala e as suas implicações nas condições atmosféricas, as ocorrências mais relevantes são caracterizadas de acordo com a sua respectiva escala espacial, voltado para a identificação de ocorrências de maior importância no fluxo atmosférico. As regiões consideradas para determinar as ocorrências meteorológicas correspondem a Portugal, Polónia, Roménia e Cabo Verde.

Este subcapítulo foi elaborado com informação presente nas referências bibliográficas [2] e [14].

3.2.1 Controlos Climáticos Semi-Permanentes

Os controlos climáticos semi-permanentes são padrões em larga escala que possuem um comportamento bem definido e de natureza maioritariamente estática. Nestas regiões os principais controlos são a temperatura à superfície do mar, sistemas de pressão marítimos, sistemas de pressão continentais e características tropicais.

As condições da temperatura da superfície do mar possuem um papel importante na determinação das condições atmosféricas, modificando a estabilidade e distúrbios sinóticos.

Sistemas de pressão marítimos são definidos como áreas de pressão atmosférica a superfície similar que possuem uma variação espacial bem definida durante o ano, devido principalmente a mudanças sazonais na radiação incidente e a consequente variação no aquecimento diferencial de oceanos e continentes.

Os sistemas de pressão continentais são formados devido ao aquecimento diferencial e a interacção entre os sistemas de pressão marítimos.

Características tropicais são determinadas pela existência de zonas de convecção bem definidas com forte componente de variabilidade sazonal.

Portugal

Os sistemas de pressão marítimos são definidos como áreas de pressão atmosférica à superfície que possuem uma variação espacial bem definida durante o ano, principalmente devido a mudanças sazonais na radiação incidente e consequente variação da temperatura à superfície dos oceanos e dos continentes. A Baixa da Islândia e a alta dos Açores são os principais sistemas que afectam a Península Ibérica.

A baixa da Islândia situa-se entre a Islândia e o sul de Gronelândia, sendo um centro semi-permanente de baixa pressão. No inverno esta formação aumenta de intensidade, uma vez que o Oceano Atlântico se encontra a uma temperatura média superior que os Continentes, e o anticiclone dos Açores deixa de funcionar como bloqueio, causando ventos fortes sobre o Oceano Atlântico Norte, o que afecta o

estado do tempo em Portugal. No verão, com o aquecimento dos Continentes, esta formação enfraquece e divide-se frequentemente em duas células de menor dimensão, uma situada junto ao estreito de Davis e outra a Oeste da Islândia, tal deve-se maioritariamente ao aumento de intensidade do Anticiclone dos Açores.

O anticiclone dos Açores é um centro semi-permanente subtropical que se encontra a sul do paralelo de 40°N, no Atlântico oriental, entre os Açores e o sudoeste da Península Ibérica. Esta formação varia a sua posição sazonalmente, migrando para Norte no verão, posicionando-se ao largo da Península Ibérica e levando à ocorrência de tempo quente, seco e estável nesta zona. No inverno, o anticiclone move-se para o sul dos Açores, e as flutuações na pressão conduzem a um tempo mais variável. Esta formação anti-ciclónica pode ser observada na Figura 2 ao largo de Portugal Continental, sobre os Açores.

A Oscilação do Atlântico Norte (NAO) é o principal modo de variabilidade da pressão ao nível do mar sobre o Norte do Oceano Atlântico. O padrão espacial da NAO consiste num dipolo com orientação aproximadamente Norte/Sul, sendo estes o Baixa da Islândia e o anticiclone dos Açores. O índice NAO oscila entre fases positivas e negativas, sendo positivo quando a depressão na Islândia é elevada e o anticiclone dos Açores se encontra forte, e negativo quando a depressão da Islândia é fraca devido ao facto de o anticiclone dos Açores se encontrar fraco. A NAO tem uma grande influência nas condições atmosféricas da Europa, nomeadamente na temperatura à superfície, precipitação e vento. Os ventos com direcção de Oeste aumentam em períodos cujo índice NAO é elevado devido à intensidade das formações ciclónicas no Atlântico Norte. Por outro lado, quando as mesmas se encontram mais fracas, os ventos de oeste são suprimidos, dando lugar a ventos predominantemente de Sul, provenientes do Mar Mediterrâneo. Especialmente durante o mês de Novembro, a NAO é responsável pela maioria das alterações de direcção e velocidade do vento.

Polónia & Roménia

A atmosfera pode ser considerada como sendo estável, quando comparada com a Europa oriental e mediterrânea, dado que as condições à superfície têm um baixo índice de humidade. O clima da região é predominantemente continental temperado devido às mudanças sazonais na radiação incidente, tendo invernos severos.

O principal sistema que afecta a Europa de Leste é o Anticiclone de Inverno da Sibéria, sendo um centro quase permanente de alta pressão no inverno, no entanto

sofre ainda a influência da baixa da Islândia, o Anticiclone dos Açores, a alta do Estes Asiático no Inverno e a baixa do Sul da Ásia no Verão. O Anticiclone de Inverno da Sibéria, como o próprio nome o indica, intensifica-se no inverno devido à cobertura de neve presente nos solos e a ventos continentais da Eurásia. As depressões atlânticas movem-se frequentemente para leste no inverno, em direcção aos mares da Noruega ou Mediterrâneo, mas acabam por se tornar oclusas e perder intensidade antes de atingir a Sibéria, o que lhe confere o estatuto de quase permanente. Este centro de altas pressões influencia bastante a zona da Europa que se apresenta ao seu ocidente, fazendo com o inverno seja, frio e ventoso.

Cabo Verde

A temperatura da superfície do mar possui um papel importante na determinação das condições atmosféricas, modificando a estabilidade e distúrbios sinóticos. Esta região é afectada pela corrente das Canárias. Esta corrente possui águas mais frias que as correntes circundantes, tal ocorre devido ao fenómeno de upwelling que torna as suas águas ricas em nutrientes. A característica da temperatura destas correntes confere uma fonte constante de humidade com uma variação sazonal reduzida. A estabilidade no perfil de temperatura permite a manutenção de fluxos atmosféricos de origem térmica ao longo da costa.

Os sistemas de pressão marítimos são definidos como áreas de pressão atmosférica a superfície similar, que possuem uma variação espacial bem definida durante o ano, devido principalmente a mudanças sazonais na radiação incidente e a consequente variação no aquecimento diferencial de oceanos e continentes.

Características tropicais são determinadas pela existência de zonas de convecção bem definidas com forte componente de variabilidade sazonal. Nesta região em particular a zona de convergência inter-tropical (ITCZ – Intertropical Convergence Zone) pode afectar a zona em questão. A ITCZ possui uma posição mais a Norte do que o habitual no verão, deslocando-se aproximadamente até aos 20°N, e consequentemente aumentar a instabilidade local, particularmente quando associado com distúrbios sinóticos e de mesoescala.

3.2.2 Distúrbios Sinópticos

Distúrbios sinópticos são ocorrências meteorológicas transientes moldadas por condições climáticas semi-permanentes, sendo de natureza instável, e com uma duração de diversos dias.

Portugal

A presença do anticiclone dos Açores ao largo da Península Ibérica no Verão funciona como bloqueio a massas de ar no território nacional, tornando o tempo quente e seco (CSa, segundo a classificação de Köppen [23]).

Portugal continental encontra-se situado a sudoeste da Península Ibérica, sofrendo a influência fisiográfica de dois Continentes, a Europa e a África, e de um Oceano, o Atlântico Norte, e em menor escala do Mar Mediterrâneo. As massas de ar que influenciam as condições meteorológicas em Portugal Continental são as de ar polar, tropical, continental e marítimo. As massas de ar que atingem o território nacional normalmente não conservam as suas propriedades originais devido às longas distâncias que percorrem, adquirindo propriedades regionais, com a excepção das massas polar.

Portugal Continental é influenciado por massas de ar polar que se encontram em permanente movimento. Estas deslocam-se latitudinariamente acompanhando o movimento anual aparente do Sol, e deslocam-se no sentido oeste/este, levando à ocorrência de uma sucessão de estados de tempo particulares.

A superfície frontal polar do Hemisfério Norte resulta do confronto entre as massas de ar quente tropical com as massas de ar polar. As frentes provocadas por massas de ar polar, devido à sua instabilidade, podem levar à ocorrência de ventos fortes, elevados gradientes de temperatura, ou até mesmo inversões térmicas durante a sua passagem.

Polónia & Roménia

A Europa de Leste é influenciada por massas de ar polar que se encontram em permanente movimento. Estas deslocam-se latitudinariamente acompanhando o movimento anual aparente do Sol, e deslocam-se no sentido oeste/este, levando à ocorrência de uma sucessão de estados de tempo particulares.

A frente mediterrânea encontra-se sobre a área compreendida entre os mares Mediterrâneo e o Cáspio na estação de Inverno. As massas de ar continental polar

(cP) e marítimo polar (mP), provenientes do Sudeste da Europa e do oceano Atlântico, respectivamente, convergem com massas de ar mornas provenientes do Norte de África sobre a linha entre as bacias do Mar Mediterrâneo e do Mar Cáspio originando a frontogénese. No verão esta formação frontal é dissipada devido à penetração do Anticiclone subtropical dos Açores na bacia Mediterrânea.

Cabo Verde

Esta região sofre influência dos ventos de leste tropicais, com origem nas baixas latitudes junto às células de alta pressão subtropicais, devido a estas e à rotação da Terra, sendo portanto mais fortes durante o período de inverno. Estes ventos são caracterizados por serem quentes, uma vez que se deslocam de uma zona árida do Continente para o Oceano.

O clima em Cabo Verde é caracterizado por ser quente e seco (mT) nas camadas mais baixas e com estratificação estável, uma vez que estamos a falar num local a Nordeste da zona tropical Atlântica.

As monções de verão raramente afectam as ilhas de Cabo Verde, apesar de na literatura se encontram descrito que o fenómeno de chuvadas intensas de Verão se estende até cerca de 20°N na Costa Oeste de África, a realidade é que tal não tem ocorrido nos últimos anos, sendo o clima da região árido ou semi-árido. Neste local ocorrem apenas duas estações do ano, *as-águas* ou *as-secas* (ou tempo de brisas). A estação seca (Dezembro a Julho) é caracterizada por ventos constantes, normalmente denominados por *bruma seca* trazida pelo vento harmatão das areias do Saara.

3.2.3 Efeitos locais e de Mesoescala

Estes efeitos locais são ocorrências transientes com duração de algumas horas até aproximadamente 3 dias, possuindo uma elevada dependência nas características regionais, como a topografia e tipo de solo.

Portugal

Nas regiões simuladas podem ocorrer brisas de montanha e similares, efeitos predominantes desde que as condições locais assim o favoreçam.

De acordo com as condições topográficas presentes na zona de estudo existe a possibilidade de ocorrência de brisas de montanha, onde devido à existência destes

vales a direcção do vento será orientada segundo estes e não segundo o fluxo sinóptico. Nas situações em que a brisa seja orientada na mesma direcção que o fluxo sinóptico vai-se observar uma velocidade do vento superior à esperada, na situação contrária o fluxo do vento vai-se dar segundo a orientação da brisa mas em módulo mais fraco.

Polónia

A região simulada da Polónia é caracterizada por terras baixas, com a excepção do limite sul onde se encontram os Montes Cárpatos.

Devido às condições topográficas no limite sul da área de simulação, podem ocorrer brisas de montanha, estas serão orientadas segundo os vales e não segundo o fluxo sinóptico.

Roménia

Na região em questão podem-se observar brisas terra/mar, podendo ser predominantes desde que as condições locais os favoreçam. Essas brisas são dependentes de gradientes de temperatura elevados, consequentemente a ocorrência dos mesmos varia amplamente ao longo da área de análise.

Cabo Verde

Nesta região em particular, brisas terra/mar, ventos de montanha e similares são predominantes desde que as condições locais os favoreçam. Essas brisas são dependentes de gradientes de temperatura elevados e levantamento orográfico, consequentemente a ocorrência dos mesmos varia amplamente ao longo da área de análise.

Enquanto as características locais prevalecem sobre a ocorrência de tais efeitos, o fluxo sinóptico favorece a maior penetração de brisas terra/mar durante o dia, alcançando estes quase a zona de estudo, até aonde não exista acidentes topográficos atenuantes. Consequentemente tal fluxo age como um redutor na intensidade da brisa terra/mar nocturna.

3.3 Dados Reais

As medições utilizadas neste trabalho são provenientes de campanhas de medição conduzidas pela MEGAJOULE, por questões de confidencialidade não serão mencionados os locais exactos dos mastros anemométricos.

3.3.1 Método de aquisição de dados

Os dados utilizados na validação são provenientes de campanhas de medição de vento com o propósito de avaliar o recurso eólico. Os mastros anemométricos (Figura 7) encontram-se equipados com cata-ventos e anemómetros de copos devidamente calibrados a variadas alturas. Estes têm uma frequência de aquisição de 1Hz, no entanto os valores de velocidade e direcção do vento são registados com uma periodicidade 10 minutos. Os dados utilizados para validar os resultados das simulações numéricas foram todos adquiridos a 60 ou 61 metros acima do nível do solo, com a excepção da estação da Polónia nomeada como PL4, cujos equipamentos de medição se encontravam a 39 metros acima do nível do solo.

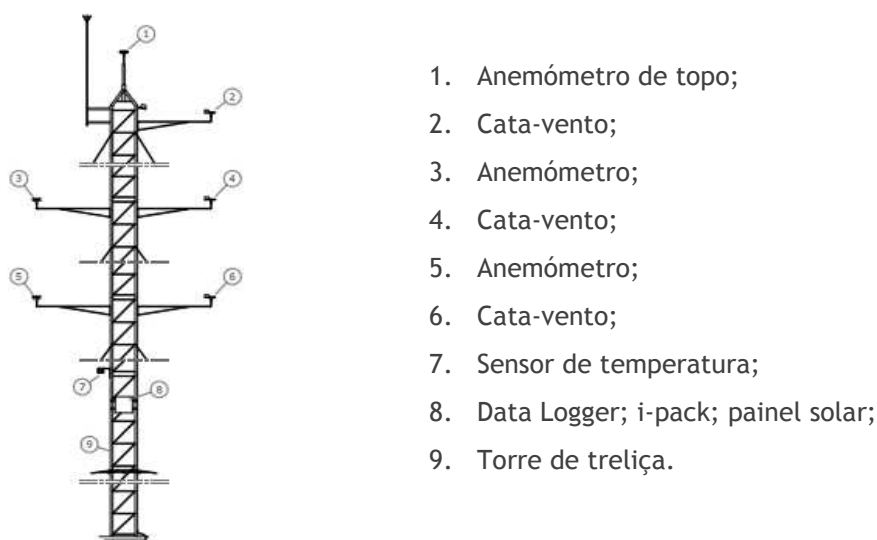


Figura 7 - Esquema representativo de mastro anemométrico instrumentado a várias alturas.

3.3.2 Análise de dados

Os dados provenientes das campanhas de medição são analisados periodicamente com o objectivo de manter a qualidade dos dados medidos. Por vezes são detectadas anomalias nos dados durante este procedimento, estas devem-se normalmente a eventos meteorológicos extremos para o equipamento de medição ou problemas neste, levando a que os dados nesses períodos sejam invalidados.

Para proceder a este trabalho foram utilizados dados provenientes de 14 mastros anemométricos situados na zona centro e litoral de Portugal continental, 6 na zona este da Polónia, 14 na zona Sudeste da Roménia e 4 dispersas pelas Ilhas de Cabo Verde. Consoante o período de dados disponível para cada uma das estações procedeu-se à validação dos dados de vento obtidos com recurso ao modelo de previsão numérica WRF em períodos de 6 ou 12 meses.

3.3.3 Análise dos regimes de vento no contexto do aproveitamento energético do recurso eólico

As estatísticas analisadas neste estudo reflectem o fim em vista, o aproveitamento energético do recurso eólico por turbinas de eixo horizontal. As turbinas eólicas a instalar em cada parque têm de se encontrar de acordo com o regime de ventos local (Figura 8) para suportar este e operar durante todo o período de operação do parque. Um parque eólico é projectado para ter um período de vida na ordem dos 20 a 30 anos, motivo pelo qual a velocidade média do vento é um dos parâmetros mais importantes na projecção deste.

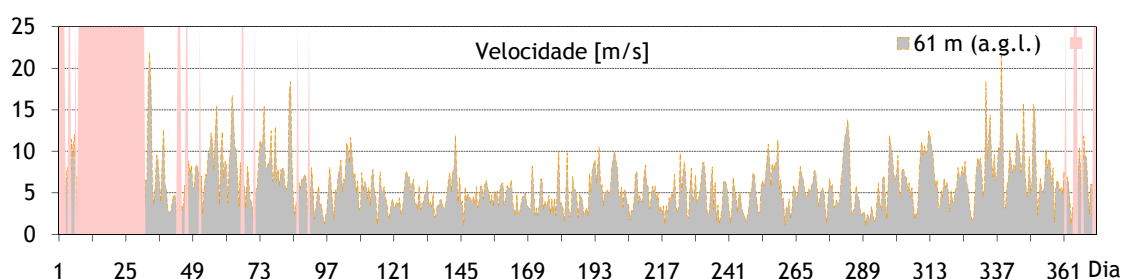


Figura 8 - Registos de velocidade de uma campanha de medição a 61 acima do nível do solo.

A análise dos regimes de vento é efectuada com recurso a alguns parâmetros específicos para o efeito, como a velocidade média, histograma da distribuição de frequência, parâmetros da distribuição de weibull, rosa-dos-ventos, velocidade média sectorial e contribuição energética por sector.

Velocidade e Direcção do Vento

A velocidade do vento é calculada (1) com base nas componentes u e v do vento, componente zonal e meridional, respectivamente e a direcção do vento (2) corresponde à orientação do vector de velocidade.

$$Vel = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$dir = 270 - \frac{\tan^{-1}(u,v) \cdot 180}{\pi}, \quad \text{se } dir > 360: dir = 270 - \frac{\tan^{-1}(u,v) \cdot 180}{\pi} - 360 \quad (2)$$

Histograma de Frequência e Distribuição de Weibull

O Histograma de distribuição de frequência da velocidade do vento (Figura 9) apresenta, em percentagem, a frequência de ocorrência de cada uma das gamas de velocidades estabelecidas. No caso da Figura 9 encontra-se representada a distribuição de frequência em intervalos de 1 m/s.

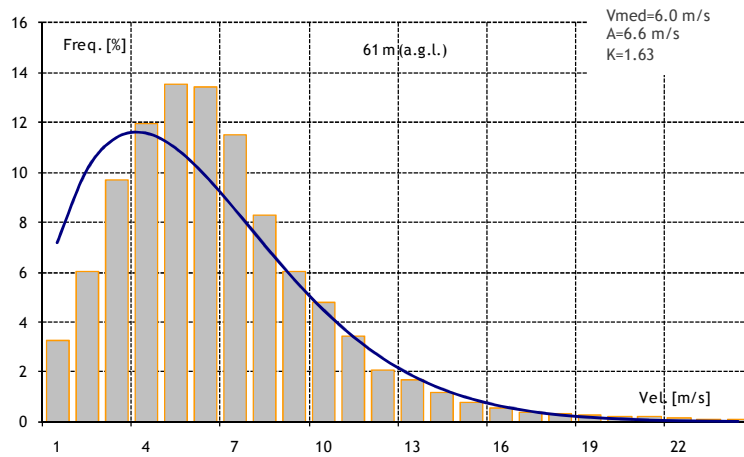


Figura 9 - Histograma de velocidades e distribuição de Weibull.

A distribuição de Weibull, também representada na Figura 9, corresponde à distribuição estatística utilizada na descrição da velocidade do vento. Esta distribuição caracteriza-se por duas constantes, o factor de forma, k , e o factor de escala, A ,

$$f(v) = \left(\frac{k}{A}\right) \times \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (3)$$

Onde:

$f(v)$: função de densidade de probabilidade
 v : velocidade média do vento (m/s)

As Figuras 10 e 11 ilustram distribuições de Weibull, com diferentes factores de escala (A) e factor de forma (k) constante e com diferentes factores de forma e factor de escala constantes, respectivamente. Observando a Figura 10 pode-se verificar que a dispersão dos dados em torno do valor é tanto maior quanto maior for o valor do factor de escala (A). Se considerar o valor de A como sendo uma constante pode-se averiguar que para valores de k elevados existe pouca variação

em torno do valor médio, no entanto para valores k baixos existe uma elevada variação em torno do valor médio.

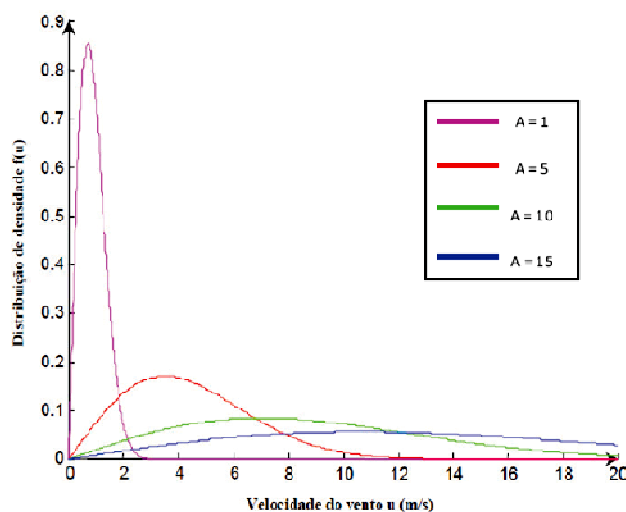


Figura 10 - Função de distribuição de densidade de Weibull para $k=2$ e A variável.

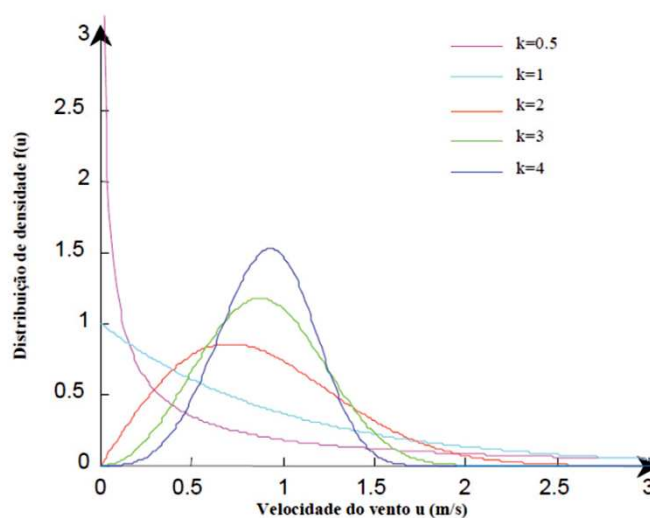


Figura 11 - Função de distribuição de densidade de Weibull para $A=1$ e k variável.

Rosas de distribuição de grandezas

Na avaliação do recurso eólico é comum apresentar grandezas de acordo com os sectores do vento. As análises sectoriais apresentadas ao longo deste trabalho serão apresentadas em 12 sectores. A rosa-dos-ventos representa a percentagem de ocorrências que a direcção do vento se encontrou em cada sector (Figura 12, esquerda). A velocidade média sectorial (Figura 12, direita) representa a velocidade

média calculada para cada um dos sectores discriminados. A informação das duas distribuições da Figura 12 é utilizada para calcular a rosa-dos-ventos energética (Figura 13), ou seja, esta é calculada com base no número de ocorrências e na velocidade média por sector.

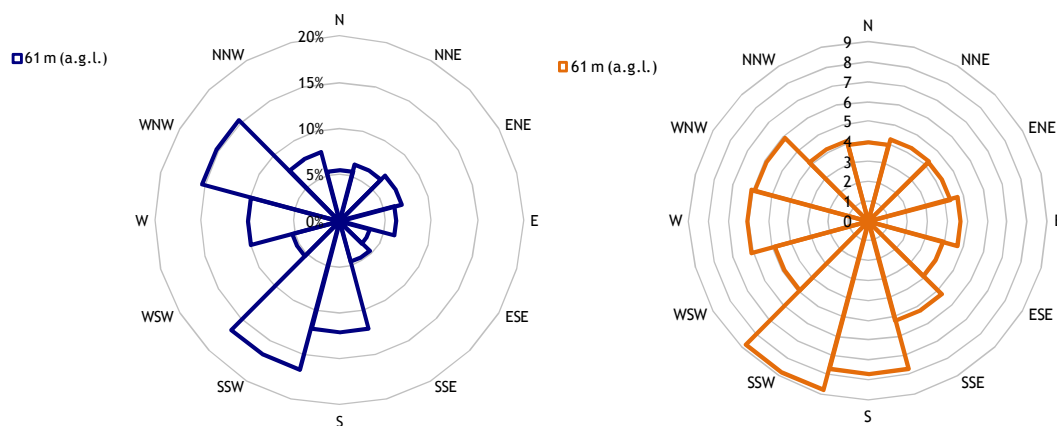


Figura 12 - Rosa-dos-ventos (esquerda) e velocidade média por sector (direita).

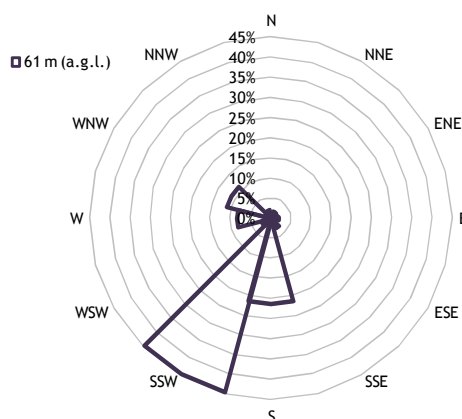


Figura 13 - Rosa-dos-ventos energética.

3.4 Metodologia de Validação

A abordagem seguida para a realização deste trabalho baseia-se na utilização de dados provenientes de campanhas de medição de vento para a avaliação do vento simulado pelo modelo de previsão numérica WRF. Dado que os valores de saída do modelo são instantâneos foram considerados, apenas, os valores instantâneos horários dos dados observados. As séries de dados sofreram outra intervenção

antes de serem iniciados os cálculos seguidamente apresentados, tendo sido esta a invalidação dos períodos em que não existiam dados ou existiam anomalias. Para este trabalho foram consideradas apenas as estações que tinham uma cobertura de dados superior a 85%.

Para avaliar o ajuste da simulação à realidade do recurso eólico nos diversos locais em estudo foram utilizadas diversas medidas de comparação entre as séries de dados reais e simulados. As grandezas analisadas neste estudo para avaliar o comportamento do vento passaram pela velocidade horizontal do vento e direcção ou rumo do vento. No anterior subcapítulo foram abordadas essas grandezas, assim como o histograma de velocidades, parâmetros de distribuição de Weibull e rosas de distribuição sectoriais.

Na avaliação do recurso eólico foram utilizadas grandezas estatísticas como a velocidade média e máxima, a regressão linear (m , b) e o respectivo coeficiente de correlação regressão linear (R^2) e os desvios nos parâmetros de Weibull.

Os critérios estatísticos para avaliação dos erros globais de cada simulação utilizados consistiram no erro absoluto médio (MAE), no erro médio quadrático (RMSE), no erro médio (BIAS), no índice de concordância (d) e no desvio padrão (STDE).

MAE

O MAE (4) indica o desvio médio absoluto dos valores simulados face aos valores observados, sendo melhor quanto mais próximo de zero se encontrar.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta'_i| \quad (4)$$

Onde $\theta' = \theta_s - \theta_o$, com θ_s a representar o valor simulado e θ_o a representar o valor observado.

RMSE

O RMSE (5) é uma medida da variação dos valores simulados face aos valores observados e assim como o MAE também é melhor quanto mais próximo de zero se encontrar.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta'_i)^2} \quad (5)$$

Onde $\theta' = \theta_s - \theta_o$, com θ_s a representar o valor simulado e θ_o a representar o valor observado.

BIAS

O BIAS (6) averigua o enviesamento dos dados, ou seja, se for positivo indica que os valores simulados se encontram sobrestimados face aos observados e se for negativo encontram-se subestimados.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta'_i \quad (6)$$

Onde $\theta' = \theta_s - \theta_o$, com θ_s a representar o valor simulado e θ_o a representar o valor observado.

Índice de Concordância

O índice de concordância da intensidade do vento (7) indica o grau de ajuste dos dados simulados aos dados observados, sendo que $d=1$ corresponde a uma concordância perfeita entre o simulado e o observado e $d=0$ corresponde a uma discordância total entre ambos [27].

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (7)$$

Onde p_i representa o valor simulado ou previsto, o_i representa o valor observado e \bar{o} o valor médio observado.

Desvio Padrão

O desvio padrão (8) é uma forma avaliação quantitativa dos dados simulados pelo modelo de simulação numérica WRF , esta medida avalia a dispersão do erro.

$$STDE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\theta'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta'_i \right)^2} = \sqrt{RMSE^2 - BIAS^2} \quad (8)$$

4 Resultados e Discussão

As análises que se seguem para a região de interesse consideram os resultados do domínio interno apenas, e as horas apresentadas nos anexos são de acordo com UTC (Universal Coordinated Time).

4.1 Portugal

4.1.1 Simulação 1

O período de simulação concordante com os dados medidos decorre do início de Novembro de 2009 até ao final de Abril de 2010. A área simulada pode ser caracterizada como sendo interior com relevo. Seguidamente serão apresentados os resultados obtidos para a velocidade do vento, rosas-dos-ventos dos locais para os quais se observam o menor e maior desvio em velocidade e parâmetros da distribuição de Weibull, assim como a concordância entre os dados reais e simulados.

Tabela 3 - Velocidade média semestral observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas.

	Vel. Média (m/s)		Desvio (m/s)	Desvio (%)	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	BIAS (m/s)	STDE (m/s)
	Obs.	Sim.						
P1.1	5,86	6,45	0,59	10,07	0,43	0,53	0,24	0,47
P1.2	6,56	7,30	0,74	11,28				
P1.3	7,47	7,93	0,46	6,16				
P1.4	7,87	7,85	-0,02	-0,25				
P1.5	6,87	7,58	0,71	10,33				
P1.6	8,97	8,20	-0,77	-8,58				
P1.7	8,35	8,43	0,08	0,96				
P1.8	6,46	6,56	0,10	1,55				

Face aos resultados obtidos pode-se observar que os desvios são quase sempre positivos. De uma forma geral o modelo encontra-se a sobrestimar a velocidade vento face ao observado, o que se pode comprovar observando o BIAS positivo.

Tabela 4 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.

	Vel. Máxima (m/s)			k			d (m/s)
	Obs.	Sim.	Desvio (m/s)	Obs.	Sim.	Desvio	
P1.1	21,70	18,50	-3,20	1,91	2,23	0,32	0,83
P1.2	26,40	20,17	-6,23	1,77	2,41	0,64	0,85
P1.3	26,64	20,02	-6,62	1,99	2,80	0,81	0,86
P1.4	26,57	20,20	-6,37	2,01	2,64	0,63	0,86
P1.5	25,21	19,61	-5,60	1,86	2,44	0,58	0,83
P1.6	25,11	17,88	-7,23	2,16	3,07	0,91	0,99
P1.7	23,87	18,59	-5,28	2,37	2,95	0,58	0,89
P1.8	25,70	18,86	-6,84	2,39	2,57	0,18	0,90

Os valores obtidos para o factor de forma referente à simulação é sempre superior ao medido o que evidencia que, pese embora a velocidade média seja sobrestimada, as velocidades superiores são subestimadas. Tal pode também ser evidenciado pela estimativa do valor máximo da velocidade.

O índice de concordância, bem como a qualidade das regressões lineares, mostra que a série de intensidades do vento simulada aproxima segue a tendência observada, pese embora os desvios discutidos.

Tabela 5 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.

	Parâmetros de Correlação		
	m	b (m/s)	R ² (m/s)
P1.1	0,681	2,419	0,510
P1.2	0,660	2,940	0,588
P1.3	0,672	2,896	0,560
P1.4	0,622	2,912	0,586
P1.5	0,639	3,211	0,516
P1.6	0,622	2,649	0,743
P1.7	0,770	2,024	0,640
P1.8	0,816	1,347	0,670

Os valores obtidos para o coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) entre as velocidades simuladas e observadas variam aproximadamente entre 0,51 e 0,74.

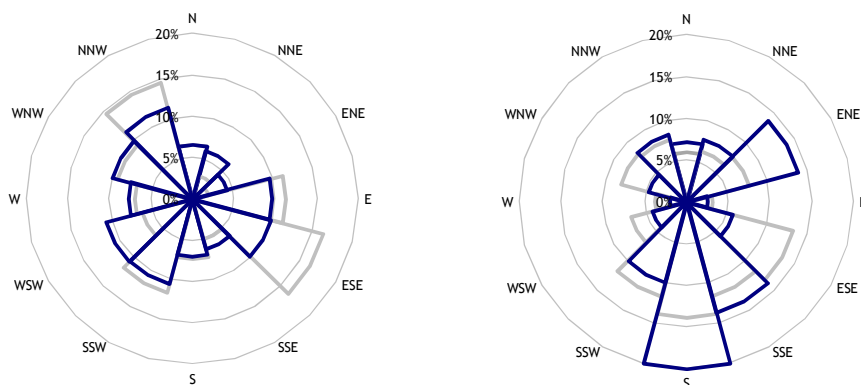


Figura 14 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local P1.6 e P1.5. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza correspondem às direcções simuladas. Simulação 1, Portugal.

Comparados os sectores das rosas-dos-ventos com dados observados face aos com dados simulados pode-se aferir que a representação é aceitável. O modelo numérico foi capaz de captar os sectores predominantes, embora a frequência das ocorrências não seja idêntica. Analisando ambas as rosas e os seus desvios sectoriais pode-se verificar que existe um desvio para Oeste das ocorrências simuladas face à realidade, ou seja, existe um desvio ciclónico nos valores de direcção obtidos a partir do modelo de Mesoescala.

4.1.2 Simulação 2

O período de simulação concordante com os dados medidos decorre do início de Julho de 2009 até ao final do ano de 2009. A área simulada pode ser caracterizada como contendo zonas de litoral e de interior com algum relevo, no entanto os locais em estudo encontram-se em locais não afectados com efeitos de brisa terra/mar e topografia acentuada. Seguidamente serão apresentados os resultados obtidos para a velocidade do vento, rosas-dos-ventos dos locais para os quais se observam o menor e maior desvio em velocidade e parâmetros da distribuição de Weibull, assim como a concordância entre os dados reais e simulados.

Tabela 6 - Velocidade média semestral observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas.

	Vel. Média (m/s)		Desvio (m/s)	Desvio (%)	MAE (m/s)	RMSE	BIAS (m/s)	STDE (m/s)
	Obs.	Sim.						
P2.1	8,50	9,05	0,55	6,47	0,86	0,93	-0,37	0,85
P2.2	8,08	7,16	-0,92	-11,39				
P2.3	8,93	7,36	-1,57	-17,58				
P2.4	8,96	8,30	-0,66	-7,37				
P2.5	8,00	8,91	0,91	11,38				
P2.6	8,66	8,12	-0,54	-6,24				

Os desvios obtidos não são de ordem sistemática, no entanto prevalecem os desvios negativos. Na maioria das análises o modelo parece fazer uma subestimava da velocidade vento face ao observado, o que se comprova se pode comprovar com um BIAS negativo.

Tabela 7 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.

	Vel. Máxima (m/s)		Desvio (m/s)	k		Desvio	d (m/s)
	Obs.	Sim.		Obs.	Sim.		
P2.1	30,68	20,14	-10,54	2,65	2,41	-0,24	0,86
P2.2	25,58	16,86	-8,72	2,90	3,23	0,33	0,83
P2.3	23,70	17,28	-6,42	2,66	3,44	0,78	0,73
P2.4	31,50	22,21	-9,29	2,56	2,63	0,07	0,80
P2.5	24,84	20,14	-4,70	2,10	2,42	0,32	0,90
P2.6	30,05	19,50	-10,55	2,67	2,91	0,24	0,88

Existe uma boa concordância entre os valores simulados e os valores observados, com excepção do local representado por P2.3. À semelhança da Simulação 1 para Portugal também aqui podemos verificar que os desvios do factor de forma são positivos o que indica que o modelo não está a capturar devidamente os valores máximos da velocidade do vento.

Tabela 8 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.

	Parâmetros de Correlação		
	m	b (m/s)	R ² (m/s)
P2.1	0,820	1,719	0,540
P2.2	0,607	2,252	0,651
P2.3	0,462	3,236	0,527
P2.4	0,652	2,468	0,446
P2.5	0,858	2,045	0,713
P2.6	0,731	1,785	0,637

Os valores do coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) entre as velocidades simuladas e observadas variam entre 0,44 e 0,71.

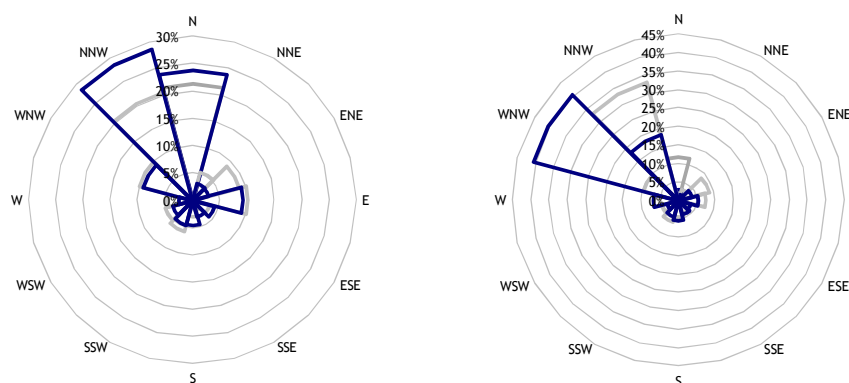


Figura 15 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local P2.5 e P2.3. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza correspondem às direcções simuladas. Simulação 2, Portugal.

Observando os sectores das rosas-dos-ventos com dados observados e com dados simulados pode-se verificar que a representação é relativamente boa no primeiro caso. O modelo numérico foi capaz de captar os sectores predominantes da rosa-dos-ventos P2.6, no entanto a nível de ocorrências existe um decréscimo no sector predominante simulado. A segunda rosa-dos-ventos apresenta um desvio para Este face à realidade, encontrando-se o sector predominante desfasado.

4.2 Polónia

O período de comparação na simulação da Polónia corresponde ao ano civil de 2008. A área simulada corresponde à zona Este da Polónia, logo trata-se de interior com terreno misto, apresentando zonas de planície e junto à fronteira Sul do domínio terreno montanhoso. Seguidamente serão apresentados os resultados obtidos para a velocidade do vento, rosas-dos-ventos dos locais para os quais se observam o menor e maior desvio em velocidade e parâmetros da distribuição de Weibull, assim como a concordância entre os dados reais e simulados.

Tabela 9 - Velocidade média anual observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas.

	Vel. Média (m/s)		Desvio (m/s)	Desvio (%)	MAE (m/s)	RMSE	BIAS (m/s)	STDE (m/s)
	Obs.	Sim.						
PL1	5,78	7,07	1,29	22,32	0,83	0,92	0,77	0,51
PL2	6,17	7,32	1,15	18,64				
PL3	6,59	7,02	0,43	6,53				
PL4	7,16	6,98	-0,18	-2,51				
PL5	6,17	6,93	0,76	12,32				
PL6	5,72	6,86	1,14	19,93				

Face aos resultados acima pode-se verificar que os desvios são de um modo geral sistemáticos. O modelo sobrestima a velocidade média do vento face ao observado no mesmo período de tempo, o que se pode comprovar pelo BIAS.

Tabela 10 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.

	Vel. Máxima (m/s)			k			d (m/s)
	Obs.	Sim.	Desvio (m/s)	Obs.	Sim.	Desvio	
PL1	22,12	20,76	-1,36	1,54	2,14	0,60	0,86
PL2	25,97	21,70	-4,27	1,63	2,10	0,47	0,88
PL3	28,39	21,77	-6,62	1,55	2,03	0,48	0,90
PL4	24,10	20,52	-3,58	1,73	2,16	0,43	0,71
PL5	21,45	19,67	-1,78	1,92	2,13	0,21	0,92
PL6	19,49	20,04	0,55	1,95	2,30	0,35	0,83

O factor de formar obtido a partir dos dados simulados dá a entender que o modelo não conseguiu capturar bem os valores de velocidade mais elevados.

Com a excepção do local assinalado com PL4 o incide de concordância é bom, o que revela que apesar dos desvios na velocidade a série de dados modelados segue bem as tendências da série real. Os valores do coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) entre as velocidades simuladas e observadas variam entre os 0.64 e os 0,78.

Tabela 11 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.

	Parâmetros de Correlação		
	m	b (m/s)	R^2 (m/s)
PL1	0,903	1,861	0,684
PL2	0,907	1,592	0,698
PL3	0,786	1,771	0,671
PL4	0,694	1,942	0,713
PL5	0,989	0,814	0,774
PL6	0,977	1,232	0,640

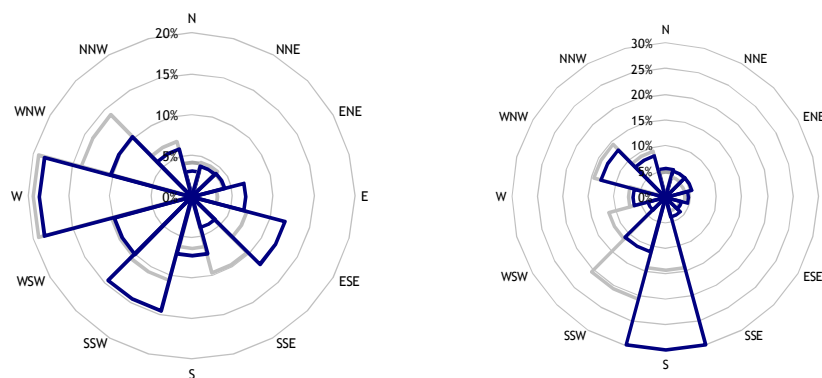


Figura 16 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local PL5 e PL4. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza correspondem às direcções simuladas. Simulação Polónia.

Observando a distribuição sectorial das rosas-dos-ventos com dados observados e com dados simulados pode-se verificar que a representação é aceitável. O modelo numérico não foi capaz de captar os sectores predominantes das rosas. Os sectores predominantes de ambas rosas-dos-ventos apresentam um desvio para Este face à realidade, ou seja, existe um desvio anti-ciclónico nos valores de direcção obtidos a partir do modelo de Mesoescala.

Os dados da estação assinalada com PL4 foram medidos a 39 metros de altura acima do nível do solo, enquanto os restantes foram medidos a 61 metros. O facto da altura de medição ser inferior às restantes pode encontrar-se na base das análises feitas terem produzido resultados distintos para este ponto.

4.3 Roménia

O período de comparação na simulação do Sudeste da Roménia corresponde ao ano civil de 2009. Como foi referido anteriormente a zona simulada corresponde ao Sudeste da Roménia, logo trata-se do litoral com o mar Negro, apresentando maioritariamente zonas de planície. Seguidamente serão apresentados os resultados obtidos para a velocidade do vento, rosas-dos-ventos dos locais para os quais se observam o menor e maior desvio em velocidade e parâmetros da distribuição de Weibull, assim como a concordância entre os dados reais e simulados.

Tabela 12 - Velocidade média anual observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas.

	Vel. Média (m/s)		Desvio (m/s)	Desvio (%)	MAE (m/s)	RMSE	BIAS (m/s)	STDE (m/s)
	Obs.	Sim.						
RO1	6,07	5,35	-0,72	-11,86	0,64	0,72	-0,64	0,33
RO2	6,19	5,43	-0,76	-12,28				
RO3	7,19	6,60	-0,59	-8,21				
RO4	5,40	5,30	-0,10	-1,85				
RO5	6,41	5,68	-0,73	-11,39				
RO6	7,00	5,75	-1,25	-17,86				
RO7	6,70	5,63	-1,07	-15,97				
RO8	6,01	5,52	-0,49	-8,15				
RO9	6,15	5,88	-0,27	-4,39				
RO10	5,97	5,26	-0,71	-11,89				
RO11	6,60	6,21	-0,39	-5,91				
RO12	6,51	5,58	-0,93	-14,29				
RO13	6,38	5,48	-0,90	-14,11				
RO14	5,78	5,69	-0,09	-1,56				

Os resultados revelam desvios de ordem sistemática. O modelo fez uma subestimava da velocidade vento face ao observado em média de 10%, o que se comprova com um BIAS negativo.

O valor de k reflecte que também no caso da Roménia as velocidades máximas não são bem capturadas, o que mais uma vez se pode verificar nos desvios negativos das velocidades máximas.

A concordância entre ambas as séries é boa. Os valores do coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) entre as velocidades simuladas e observadas variam, aproximadamente, entre 0,50 e 0,66.

Tabela 13 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.

	Vel. Máxima (m/s)		Desvio (m/s)	k		Desvio	d (m/s)
	Obs.	Sim.		Obs.	Sim.		
RO1	16,80	15,53	-1,27	2,20	2,28	0,08	0,86
RO2	18,02	15,39	-2,63	2,23	2,65	0,42	0,84
RO3	19,74	14,06	-5,68	2,25	2,54	0,29	0,88
RO4	18,18	15,01	-3,17	1,94	2,46	0,52	0,86
RO5	21,48	19,37	-2,11	2,12	2,14	0,02	0,85
RO6	21,99	15,92	-6,07	2,46	2,39	-0,07	0,78
RO7	21,78	16,15	-5,63	2,07	2,51	0,44	0,82
RO8	18,96	14,93	-4,03	2,21	2,67	0,46	0,82
RO9	20,78	18,97	-1,81	2,28	2,46	0,18	0,86
RO10	19,53	15,23	-4,30	1,92	2,03	0,11	0,84
RO11	19,19	19,39	0,20	2,21	2,34	0,13	0,83
RO12	22,39	17,48	-4,91	1,82	2,24	0,42	0,82
RO13	20,23	19,30	-0,93	2,01	2,00	-0,01	0,84
RO14	18,11	18,66	0,55	1,91	2,09	0,18	0,86

Tabela 14 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.

	Parâmetros de Correlação		
	m	b (m/s)	R ² (m/s)
RO1	0,788	0,691	0,620
RO2	0,698	1,182	0,581
RO3	0,740	1,261	0,669
RO4	0,667	1,697	0,576
RO5	0,706	1,149	0,614
RO6	0,642	1,208	0,550
RO7	0,622	1,450	0,615
RO8	0,653	1,593	0,504
RO9	0,750	1,263	0,567
RO10	0,721	0,959	0,563
RO11	0,691	1,642	0,514
RO12	0,582	1,790	0,599
RO13	0,677	1,128	0,601
RO14	0,688	1,677	0,564

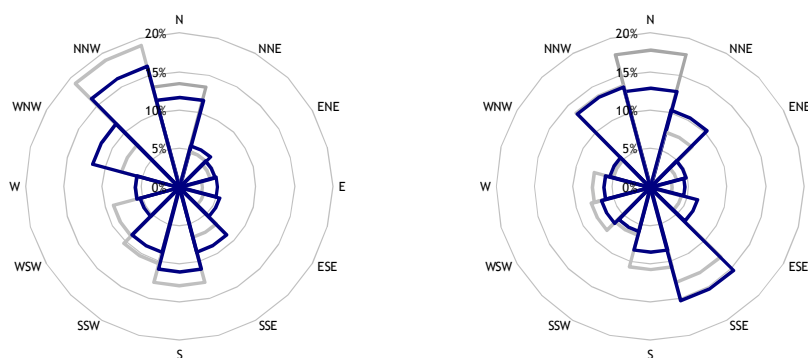


Figura 17 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local RO14 e RO6. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza corresponde às direcções simuladas. Simulação Roménia.

Observando os sectores das rosas-dos-ventos com ambos os dados pode-se verificar que a representação é relativamente boa. O modelo numérico foi capaz de captar os sectores predominantes na primeira rosa-dos-ventos, no entanto a distribuição de ocorrências não é a ideal. A segunda rosa-dos-ventos apresenta desvios superiores, encontrando-se o sector predominante desfasado.

4.4 Cabo Verde

Para Cabo verde foram efectuadas 3 simulações, a primeira corresponde às comparações CV1 e CV2 no ano de 2009, enquanto as restantes corresponde ao ano de 2001. As diversas zonas simuladas correspondem a Ilhas situadas em pleno Oceano Atlântico com topografia acentuada. Seguidamente serão apresentados os resultados obtidos para a velocidade do vento, rosas-dos-ventos dos locais para os quais se observam o menor e maior desvio em velocidade e parâmetros da distribuição de Weibull, assim como a concordância entre os dados reais e simulados.

Tabela 15 - Velocidade média anual observada e simulada, desvio e respectivas grandezas estatísticas.

	Vel. Média (m/s)		Desvio (m/s)	Desvio (%)	MAE (m/s)	RMSE	BIAS (m/s)	STDE (m/s)
	Obs.	Sim.						
CV1	8,89	7,98	-0,91	-10,24	1,81	1,94	-1,81	0,70
CV2	8,84	6,58	-2,26	-25,57				
CV3	8,46	7,09	-1,37	-16,19				
CV4	9,89	7,21	-2,68	-27,10				

Os resultados revelam desvios negativos sistemáticos, o que indica existir uma subestimava da velocidade vento por parte do modelo em cerca de 20% face ao observado, como se pode observar pelo valor do BIAS.

Tabela 16 - Velocidade máxima e factor de forma (k) observados e simulados, com respectivos desvios, assim como a concordância para cada estação.

	Vel. Máxima (m/s)			k			d (m/s)
	Obs.	Sim.	Desvio (m/s)	Obs.	Sim.	Desvio	
CV1	21,12	17,77	-3,35	3,43	3,69	0,26	0,92
CV2	18,84	15,29	-3,56	3,52	3,41	-0,11	0,78
CV3	21,01	13,66	-7,35	3,01	4,18	1,17	0,77
CV4	21,84	15,29	-6,56	3,01	3,76	0,75	0,70

Assim como a velocidade média também as velocidades superiores foram subestimada, como comprova o desvio geralmente positivo no factor de forma (k) de Weibull.

Apesar dos desvios acentuados na intensidade do vento horizontal a concordância entre os dados é aceitável, sendo mesmo boa no caso assinalado como CV1, ou seja, os dados modelados seguem as mesmas tendências dos dados reais de forma razoável. Os valores dos coeficientes de correlação ao quadrado (R^2) entre as velocidades simuladas e observadas variam entre 0,69 e 0,83, o que revela uma boa correlação apesar de os desvios serem elevados.

Tabela 17 - Parâmetros de correlação obtidos a partir da regressão linear entre a velocidade observada e simulada.

	Parâmetros de Correlação		
	m	b (m/s)	R^2 (m/s)
CV1	0,785	1,001	0,813
CV2	0,714	0,255	0,827
CV3	0,478	3,052	0,694
CV4	0,589	1,301	0,781

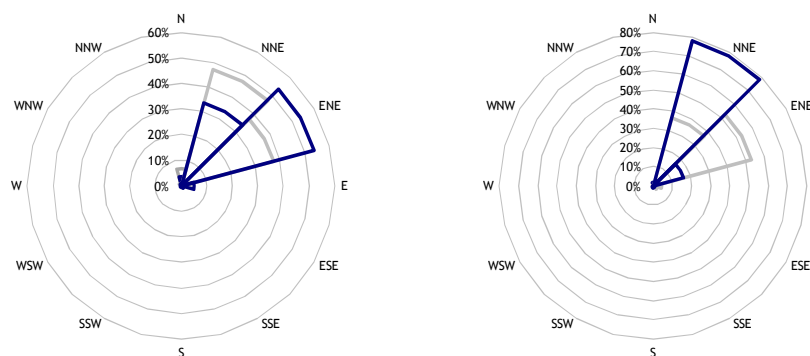


Figura 18 - Rosas-dos-ventos correspondentes ao local CV1 e CV4. A representação dos sectores das rosas-dos-ventos a azul correspondem aos dados observados enquanto os sectores a cinza corresponde às direcções simuladas, para Cabo Verde.

Observando os sectores das rosas-dos-ventos com ambos os dados pode-se observar que a representação é relativamente boa. O modelo numérico foi capaz de captar os dois sectores predominantes, no entanto as ocorrências não se encontram correctamente distribuídas. A primeira rosa-dos-ventos encontra-se com uma rotação a Oeste, enquanto a segunda apresenta uma rotação para Este.

4.5 Análise Global dos Resultados

Este subcapítulo pretende resumir as anteriores avaliações, sendo que o caso de Cabo Verde não irá constar desta análise.

Cabo Verde é um arquipélago em pelo Oceano Atlântico constituído por dez ilhas, onde o diâmetro maior corresponde à Ilha de Santiago, com aproximadamente 55 quilómetros. A reduzida dimensão das ilhas e a sua orografia acentuada não são os mais indicados para a utilização de modelos de Mesoescala devido às resoluções utilizadas neste tipo de modelos. Ao utilizar uma resolução horizontal de 3x3 km a orografia não será bem representada, o que levará a que a física do modelo não capte os fenómenos ligados a esta devidamente.

Tabela 18 - Grandezas estatísticas por zona geográfica.

	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	BIAS (m/s)	STDE (m/s)
PT	0,62	0,73	-0,02	0,74
PL	0,83	0,92	0,77	0,51
RO	0,64	0,72	-0,64	0,33

A tabela acima resume os resultados obtidos por região geográfica. O caso de Portugal teve em conta as duas simulações. O valor de BIAS obtido para Portugal tendo em conta o conjunto de dados total é muito próximo de zero. Analisando o período de comparação de ambas as simulações verifica-se que a Simulação 1 decorre de Novembro a Abril e a Simulação 2 de Julho a Dezembro, ou seja, a primeira compreende todo o Inverno e a segunda todo o Verão. Esta diferença na performance das modelações para os dois períodos indicia uma tendência sazonal nos desvios (sobrestimativa das intensidades do vento para o período mais Invernoso e subestimativa para o período de Verão). Tal indício teria contudo de ser posteriormente confirmado.

As grandezas estatísticas abaixo foram calculadas com base no conjunto de todas as estações utilizadas neste estudo com a excepção das quatro referentes ao estudo de Cabo Verde.

Tabela 19 - Grandezas estatísticas calculadas com base em todas as estações.

	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	BIAS (m/s)	STDE (m/s)
Global	0,66	0,76	-0,14	0,75

As grandezas estatísticas do global revelam que o modelo de Mesoescala aplicado a estes casos produz resultados aceitáveis para o efeito a que se propõem, e dentro dos valores que se identificaram no *benchmark* efectuado à indústria.

O valor do BIAS é baixo, quando analisado globalmente, porém, os desvios mais significativos que se identificaram para algumas regiões merecem averiguações futuras.

5 Conclusões

Os dados de mastros anemométricos a alturas onde deixam de ser notados os efeitos do escoamento de superfície encontram-se na sua maioria em locais de topografia complexa. Tal facto leva a uma constante necessidade de validação por parte das empresas de consultoria energética dos seus modelos numéricos para avaliação do recurso, objectivo partilhado neste trabalho final.

A primeira simulação para Portugal sobrestima o recurso eólico para a maioria dos locais de aquisição de dados, tendo um BIAS superior a zero, que se traduz em cerca de 4%, em média, acima da realidade. Os dados simulados têm uma boa concordância com os observados.

A segunda simulação para Portugal apresenta uma subestimativa na ordem dos 4%, o que é comprovado pelo Bias negativo. Obteve-se uma boa concordância, o que é razoável tendo em conta que as estações de medição se encontram em terreno complexo.

Avaliando todos os casos de estudo em Portugal, e tendo em conta que 8 casos compreendem os meses de Inverno e 6 casos os de Verão, obteve-se um BIAS próximo de zero, o que dá a entender que o modelo sobrestima o recurso eólico no Inverno e subestima no Verão.

A simulação para a Polónia apresenta uma sobrestimava média de aproximadamente 12% relativamente à velocidade do vento, onde o índice de concordância é na ordem dos 0,85 m/s, o que indica que apesar da estimativa da intensidade do vento ser elevada os dados simulados seguem a tendência observada.

A simulação para a zona próxima à fronteira da Roménia com o Mar Negro representa bem as direcções predominantes do vento. A velocidade do vento simulada encontra-se subestimada na ordem dos 10%, apresentando um BIAS de -0,643. O índice de concordância é de aproximadamente 0.84.

A simulação para as Ilhas de Cabo Verde é a que apresenta maiores desvios, na ordem dos 20% a menos na velocidade do vento, o que seria de esperar dada a sua localização no meio do oceano e à resolução utilizada. O índice de concordância

varia entre os 0.70 e os 0.92 o que demonstra que apesar de o desvio na intensidade do vento ser elevado este segue aproximadamente a tendência real.

Uma análise aos valores obtidos para o factor de forma da distribuição de Weibull revela que este é sistematicamente superior para os dados simulados, tal indica que o modelo não foi capaz de capturar bem as velocidades superiores.

Uma análise criteriosa aos parâmetros de entrada destas simulações revelou os problemas que afectaram os dados das simulações para esses dois países. A simulação da Polónia revelou que a proximidade da fronteira sul do domínio aos montes Cárpatos e a resolução utilizada podem ser responsáveis por os efeitos da topografia complexa não terem sido devidamente capturados. As simulações para Cabo Verde apesar de apresentarem uma boa correlação demonstraram-se insuficientes para captar a velocidade do vento, tal problema poderá advir de vários factores, com a resolução, topografia e dados de entrada. Os dados de entrada têm uma resolução muito grosseira ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$), o que por si só leva a representatividade das suas características para pequenas áreas dentro deste, no entanto este caso pode também prender-se com a fraca contribuição de dados meteorológicos do Continente Africano para formar a Reanalysis. Como foi referido no anterior capítulo trata-se de ilhas, com relativamente baixa extensão e acentuada topografia, situadas no Oceano Atlântico, o que associado à resolução horizontal de 3×3 km utilizada na simulação leva a esperar que a aceleração do vento devido à topografia seja subestimada.

Os resultados globais revelam que as estatísticas de erro obtidas, tendo em conta o procedimento adoptado na MEGAJOULE, são inferiores às dos documentos pesquisados tendo em conta a utilização de modelos de Mesoescala para avaliação do recurso eólico.

Posterior estudo, no seguimento do aqui apresentado, poderão passar pelo acrescento de mais casos de estudo; aumento da resolução horizontal de 3×3 km para 1×1 km; aumentar a frequências das observações consideradas nas comparações de horários para 10 minutos e recurso a dados de topografia provenientes de uma base de dados com levantamentos mais recentes e mais precisos, como é o caso de SRTM30.

A respeito deste último ponto, pode salientar-se que a autora iniciou já algumas averiguações, suscitando essas fortes indícios da melhoria na precisão dos resultados. Para referência, no anexo I encontram-se dois casos de estudo

conduzidos onde se podem observar as alterações obtidas utilizando SRTM30 face a GTOPO30, para o segundo caso os desvios que podem representar na velocidade média do vento comparados com dados reais.

6 Bibliografia

- [1] Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach J.T., and Witmer R.E., 1976, A land use and land cover classification system for use with remote sensor data: U.S. Geological Survey Professional Paper 964, 28 p.
- [2] Barry, R., Chorley, R., Atmosphere, Weather and Climate – eighth edition, Routledge, 2004.
- [3] Browsers, L., The Effect of Sea Surface Temperature on Sea Breeze Dynamics Along the Coast of New Jersey, New Brunswick, New Jersey, October, 2004.
- [4] Chagas, G. O.; Guedes, R.; Manso, M. D. O.; 2009. Estimating Wind Resource Using Mesoscale Modeling: EWEC 2009 proceedings. European Wind Energy Association.
- [5] Cotton, William R. ; Anthes, Richard A. - Storm and cloud dynamics. San Diego (CA): Academic Press, 1989. XII, 883 p. : il. ISBN 0-12-192530-7
- [6] Courant, R.; Friedrichs, K.; and Lewy, H. "On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics." IBM J. 11, 215-234, 1967
- [7] D.; Rogers, T.; Randall, G.; Williamson, A.; Miller, T., Comparison of WAsP, CFD, NWP and Analytical Methods for Estimating Site Wide Wind Speeds, VanLuvanee, Global Energy Concepts, LLC.
- [8] Dudhia, J, 2005: The Weather Research and Forecast model version 2.0: Physics update. WRF/MM5 User's Workshop - Jun 2005;
- [9] Dudhia, J., 2007: The Weather Research and Forecasting Model: 2007 annual update.
- [10] Ferreira, P., Castanheira, J., Rocha, A., Ferreira, J., Estudo de sensibilidade das previsões de superfície em Portugal pelo WRF face à variação das parametrizações físicas, Universidade de Aveiro, 2008.
- [11] Gemmill, William, Bert Katz and Xu Li, 2007: Daily Real-Time Global Sea Surface Temperature - High Resolution Analysis at NOAA/NCEP. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Office Note Nr. 260, 39 pp.
- [12] Hutchinson, T. A., Sousounis, P., Marshall, S., 2005: WRF enhancements for operational simulations. WRF/MM5 User's Workshop - June 2005.
- [13] Kalnay et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, 1996

- [14] Lyn, Y-L, Mesoscale Dynamics, Cambridge University press, 2007.
- [15] Lo, J. C.-F., Z.-L. Yang, and R. A. Pielke Sr. (2008), Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, J. Geophys. Res., 113, D09112, doi:10.1029/2007JD009216.
- [16] Olson, J.S., 1994a, Global ecosystem framework-definitions: USGS EROS Data Center Internal Report, Sioux Falls, SD, 37 p.
- [17] Schéma Régional Éolien – Cahier technique , Atlas Éolien de la Bretagne, Juillet 2006.
- [18] Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., and Dalcher A., 1986, A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models: Journal of Atmospheric Science , v. 43, p. 505-531.
- [19] Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Collelo, G.D., and Bounoua, L., 1996, A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs - Part I-model formulation: Journal of Climate , v. 9, p. 676-705.
- [20] Silva Paiva, L. M.; Ferreira, A. V.; Chagas, G. O.; Silva, R. M, (2006), Determination of wind farms for the Bahia State using numerical simulation of the atmospheric flow, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, American Meteorological Society.
- [21] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005: A description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech Notes-468+STR.
- [22] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (NCAR Technical Note), Mesoscale and Microscale Meteorology Division do NCAR.
- [23] Strahler, Arthur N., Strahler, Arthur H., Elements of Physical Geography. John Wiley & Sons, 1984.
- [24] The FirstLook Global Wind Dataset: Annual Mean Validation, 3TIER, January 2009.
- [25] Verdin, K.L., and Greenlee, S.K., 1996. Development of continental scale digital elevation models and extraction of hydrographic features. In: Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, January 21-26, 1996. National Center for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, California.

[26] WMO No. 100, 3rd edition, June 2010. Guide to Climatological Practices

[27] Willmott, C. J. On the validation of models. *Physical Geography, Norwich*, v. 2, n. 2, 1981.

Anexo I

Caso I - Portugal

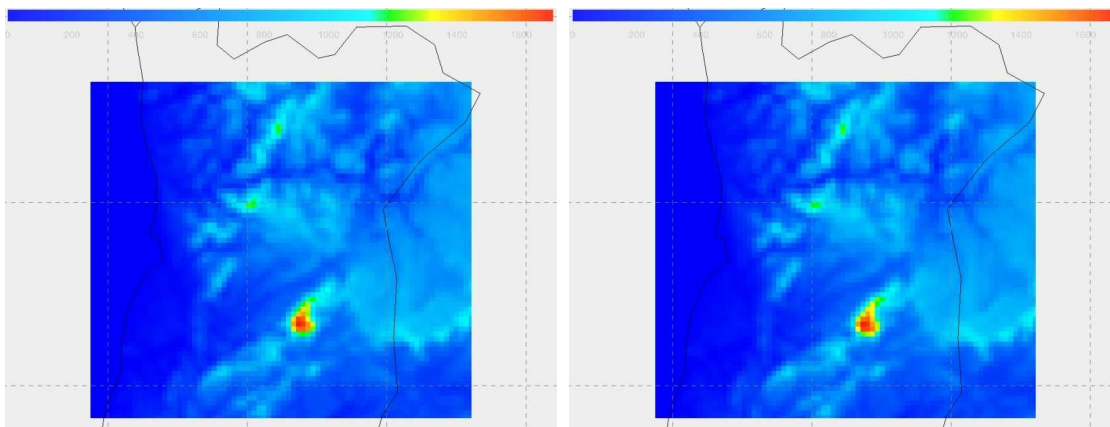


Figura 19 - Topografias geradas para o modelo de previsão numérica WRF com GTOPO30 à esquerda e com SRTM30 à direita. Domínios com resolução horizontal de 3x3 km.

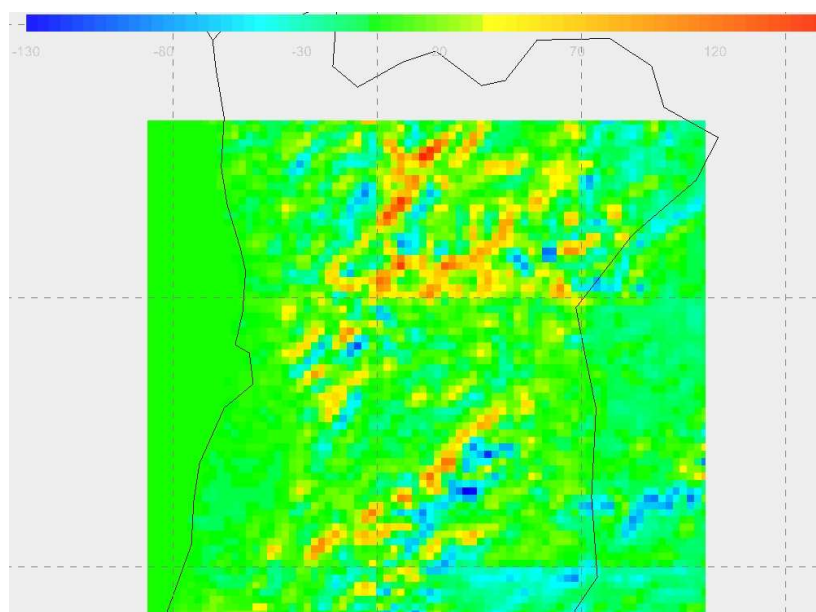


Figura 20 - Diferença entre GTOPO30 e SRTM30

Tabela 20 - Desvios entre GTOPO30 e SRTM30

	Desvio
Maior Positivo	168.4063
Maior Negativo	-130.4375
Médio	0.6774

A diferença entre ambas as topografias revelam que a topografia com GTOPO30 é em média mais elevada que com SRTM30 para esta zona de PT;

Os desvios de maior amplitude positiva encontram-se precedidos dos de maior amplitude negativa o que indica um desvio para Oeste de GTOPO30 face a SRTM30.

Caso II - Polónia

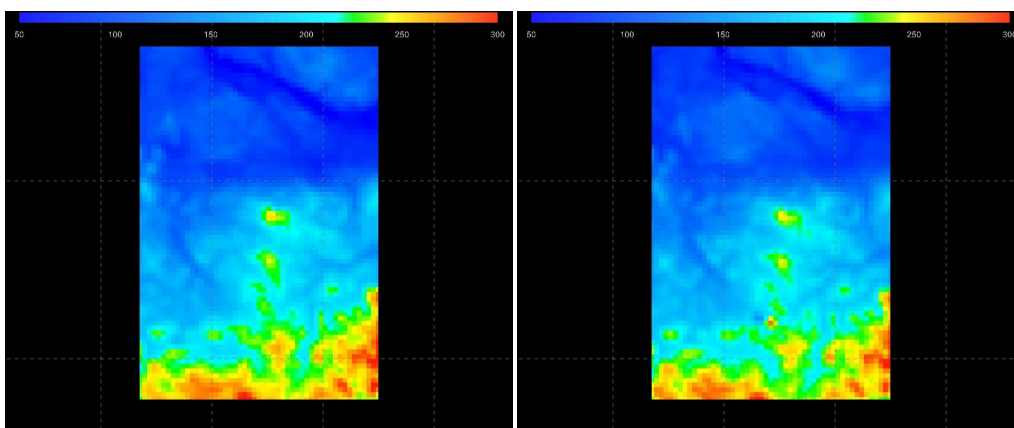


Figura 21 - Topografias geradas para o modelo de previsão numérica WRF com GTOPO30 à esquerda e com SRTM30 à direita. Domínios com resolução horizontal de 3x3 km.

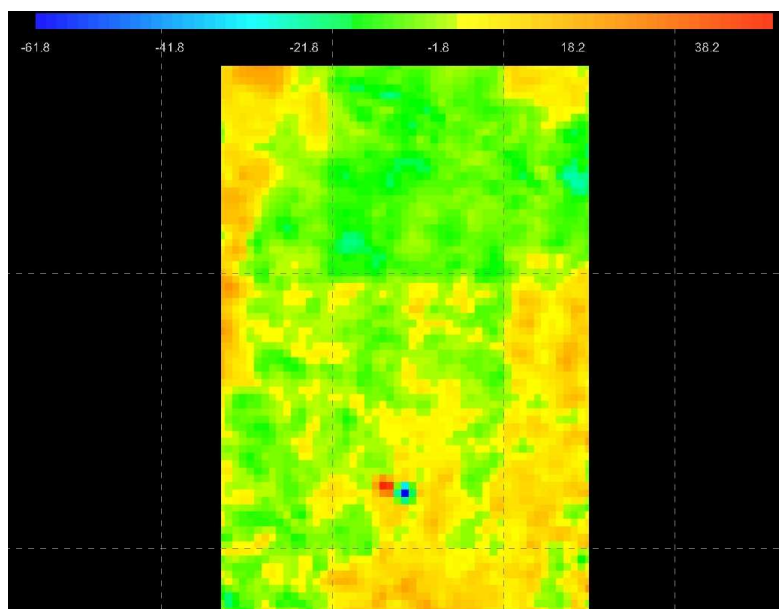


Figura 22 - Diferença entre GTOPO30 e SRTM30

Tabela 21 - Desvios entre GTOPO30 e SRTM30

	Desvio
Maior Positivo	48.0206
Maior Negativo	-61.8112
Médio	-0.3526

Tabela 22 - Comparação dos principais parâmetros de avaliação do vento no âmbito do recurso eólico em 3 estações a diversas alturas.

	Altura [m]	Vel. média [m/s]	Distribuição de Weibull		Vel. máx. [m/s]
			A [m/s]	k	
Estação 1	50m_Est	5.0	5.8	2.51	15.6
	50m_Gtopo	6.3	7.1	2.38	20.5
	50m_SRTM	6.1	6.8	2.36	16.3
	79m_Est	5.7	6.6	2.71	16.6
	79m_Gtopo	6.9	7.7	2.37	20.9
	79m_SRTM	6.6	7.5	2.45	17.5
	81m_Est	5.8	6.6	2.56	16.6
	81m_Gtopo	6.9	7.8	2.45	20.9
	81m_SRTM	6.7	7.5	2.40	17.6
Estação 2	50m_Est	4.8	5.4	2.48	12.6
	50m_Gtopo	6.0	6.7	2.46	15.0
	50m_SRTM	5.6	6.3	2.67	13.3
	81m_Est	5.4	6.2	2.66	14.0
	81m_Gtopo	6.5	7.3	2.58	15.6
	81m_SRTM	6.1	6.9	2.69	14.3
Estação 3	30m_Est	4.7	5.3	2.45	16.0
	30m_Gtopo	5.8	6.5	2.54	15.4
	30m_SRTM	5.5	6.2	2.53	16.1
	60m_Est	5.8	6.6	2.82	17.2
	60m_Gtopo	6.5	7.3	2.53	16.6
	60m_SRTM	6.2	7.1	2.67	17.7

Comparando a topografia com GTOPO30 e SRTM30 directamente não ressaltam grandes diferenças devido à escala;

A imagem com as diferenças entre topografias mostra que estas são generalizadas e não só nas zonas de topografia mais acentuada;

A velocidade média anual da simulação com SRTM aproxima-se ligeiramente melhor em todos os casos;

Comparando os factores da distribuição de Weibull pode-se verificar que:

- O parâmetro de escala (A) dos dados simulados com SRTM tem uma melhor aproximação aos reais para todos os locais e alturas;
- O parâmetro de forma (k) dos dados simulados com SRTM é melhor em 4 dos 7 casos;

De uma forma geral pode-se afirmar que neste caso o uso de topografia com base SRTM30 trás vantagem face ao tradicional.